

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



Laboratorijske vaje iz OE II Študijsko leto 2021/2022

IZTOK HUMAR
EDI BULIĆ
DEJAN KRIŽAJ
ANTON R. SINIGOJ

UNI in VSŠ ŠTUDIJ
1. letnik

Ljubljana, marec 2022

Kolofon

Zapis CIP

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

[COBISS.SI-ID 97884931](#)

ISBN 978-961-6999-22-9 (PDF)

Naslov: Laboratorijske vaje iz OE II : študijsko leto 2021/2022.

Nosilec avtorskih pravic: Iztok Humar.

Izdaja: prva izdaja.

Avtorji: Iztok Humar, Edi Bulić, Dejan Križaj, Anton R. Sinigoj.

Založnik: Laboratorij za osnove elektrotehnike in elektromagnetiko.

Leto izida: 2022.

Leto izdelave: 2022.

Cena: brezplačno.

Računalniški datotečni format: PDF.

Datum javne objave: 7. marca 2022.

Spletna lokacija: <https://sites.google.com/view/skripteoe>

Predgovor

Osnove elektrotehnike I in II sta temeljna predmeta, ki ju bodoči inženirji elektrotehnike poslušajo v prvem letniku študija, da si razjasnijo osnovne pojave in pojme s področja elektrotehnike ter pridobijo potrebna znanja, ki so nujna za nadaljnji študij elektrotehnike v višjih letnikih.

Študentje se pri teh predmetih srečajo z novimi pojmi in definicijami, ki jih je potrebno fizikalno utemeljiti in pokazati njihovo tehnično uporabnost. Ker ljudje s svojimi čutili nismo zmožni neposredno zaznavati električnih pojavov, kot so električno polje, električna napetost, električni tok, magnetno polje idr., ali pa bi bilo neposredno »opazovanje« za človeka lahko nevarno, si je potrebno predstaviti o električnih pojavih zgraditi z opazovanjem njihovih učinkov: sile, navora, toplote, svetlobe, zvoka idr.

In ravno to je namen laboratorijskih vaj pri predmetih iz osnov elektrotehnike: ilustrirati nekatere osnovne, sicer težko predstavljljive pojme in zakonitosti, in »videti« električno polje v okolici naelektrenih teles, »občutiti« segrevanje porabnika, »preveriti« zakone, ki veljajo v električnih vezjih, »preizkusiti« vpliv smeri električnega polja na orientacijo semen, »potrditi« obstoj inducirane napetosti v spreminjajočem magnetnem pretoku idr.

Namen laboratorijskih vaj je, da bi študenti z izvedbo določenih eksperimentov in meritev ilustrirali posamezne teme in primerjali izmerjene rezultate z izračunanimi. Ujemanje rezultatov naj študentu vliva zaupanje v teorijo. Pripravljanje na izvajanje vaj naj študentu daje zagon za sprotni študij ter redno obiskovanje predavanj in avditornih vaj. Laboratorijske vaje naj študentu pomenijo most med teoretičnim in praktičnim znanjem, ki je nujno potreben za delo v industriji; znanjem, ki se bo pri strokovnih predmetih v višjih letnikih samo še krepilo.

Na koncu se avtorji zahvaljujemo laborantu Dragu Tacarju, ki skrbi za tehnično izvedbo vaj ter sodeluje pri njihovem ustvarjanju. Zahvala velja tudi kolegu Andreju Cafuti, ki je pomagal pri risanju skic in tehnični obdelavi skripte.

Nenazadnje velja poudariti, da lahko dodatno študijsko gradivo, povezano z vsebino predmetov Osnove elektrotehnike najdete tudi na spletu: <http://oe.fe.uni-lj.si>. Ta spletna stran, kot tudi vaje in skripta se ves čas dopolnjujejo, spreminjajo in prilagajajo. Ker so namenjene prav vam, študentom, želimo, da bi pri njih pridobili nove izkušnje in znanja. Vabimo vas k soustvarjanju.

Avtorji

Kazalo

Uvod	1
1. Potek laboratorijske vaje.....	1
2. Navodila za vaje.....	1
3. Organizacija in izvedba vaj.....	2
4. Vloga in pomen skripte za vaje.....	3
Vaja 1: Magnetno polje	5
1. Obravnavana tematika	5
2. Iz prakse	5
3. Viri	7
4. Priprava	7
5. Delo v laboratoriju	15
Vaja 2: Feromagnetik v magnetnem polju	25
1. Obravnavana tematika	25
2. Iz prakse	25
3. Viri	26
4. Priprava	27
5. Delo v laboratoriju	33
Vaja 3: Vrtilno magnetno polje	41
1. Obravnavana tematika	41
2. Iz prakse	41
3. Viri	41
4. Priprava	43
5. Delo v laboratoriju	52
Vaja 4: Inducirano električno polje	61
1. Obravnavana tematika	61
2. Iz prakse	61
3. Viri	Error! Bookmark not defined.
4. Priprava	63
5. Delo v laboratoriju	67
Priloge	75
1. Teslameter.....	75
2. Osciloskop	82
3. Ampermeter	84
4. Vezalna shema vrtilnega magnetnega polja.....	85
Viri.....	87

Uvod

Laboratorijske vaje pri predmetih Osnove elektrotehnike I in II so predvidene kot dopolnitev teoretičnih razlag na predavanjih oziroma računskih zgledov pri avditornih vajah z namenom:

- a) ilustrirati in eksperimentalno potrditi nekatere teoretične ugotovitve,
- b) v praksi preveriti izračune z avditornih vaj in samostojnega dela,
- c) motivirati k sprotnem študiju in k rednemu spremljanju predavanj.

1. Potek laboratorijske vaje

Eksperimenti pri predmetu Osnove elektrotehnike II so po tematiki razvrščeni v več laboratorijskih vaj. Pravo pedagoško vrednost dobijo šele, ko so ustrezno pospremljeni z uvodno razlago in referencami, ki študenta vodijo k literaturi s potrebnim teoretskim znanjem, ter zaključeni s pripadajočimi izračuni in vprašanji, ki študenta vodijo k razmišljanju, interpretaciji rezultatov in diskusiji s kolegi in predavatelji. To narekuje potek laboratorijske vaje:

- a) priprava,
- b) izvedba eksperimentov v laboratoriju,
- c) izračuni in odgovori na vprašanja.

V nadaljevanju podajamo navodila za vaje, ki se jih morajo študentje pri svojem delu držati, da bi čimbolj enostavno in učinkovito izvedli vajo in dosegli zastavljen cilj.

2. Navodila za vaje

2.1. Priprava

Da bi študentje od laboratorijskih vaj odnesli nova (spo)znanja in izkušnje, je eksperimente potrebno izvajati z razumevanjem, kar zahteva ustrezno pripravo pred prihodom na delo v laboratoriju.

Priprava obsega študij teorije, natančno in pazljivo izvedbo nalog, vezanih na poskuse v laboratoriju, katerih teoretični izračun se v laboratoriju eksperimentalno preveri, zapis skrajšanih izračunov, rezultatov, diagramov in odgovorov.

Študentom želimo to delo olajšati, zato se del priprav izvede pod vodstvom voditelja vaje, ki na kratko predstavi teoretsko osnovo, poda navodila za izračun naloge, predstavi laboratorijske poskuse ter poda navodila za delo v laboratoriju. Nadaljnja priprava je samostojna, mora pa biti temeljita.

Nikakor ni odveč poudariti, da med priprave spada tudi redno spremljanje predavanj in avditornih vaj ter sprotno učenje.

2.2. Delo v laboratoriju – izvedba eksperimentov

Delo v laboratoriju obsega izvedbo poskusa v skladu z navodili. Ker je za tekočo izvedbo poskusa nujno potrebno določeno znanje in razumevanje, se vsakič pred izvajanjem v laboratoriju preveri pripravljenost študentov iz tekoče teme, pregleda izračun naloge in izdelava ustreznih diagramov. Študent mora imeti ustrezno izvedeno pripravo za pristop k delu v laboratoriju.

V laboratoriju poteka delo hkrati na več delovnih mestih, na vsakem izmed njih poskuse izvaja skupina več študentov. Študentje se po tem, ko zasedejo delovna mesta, najprej spoznajo z merilnimi instrumenti in ostalo opremo, potrebno za izvedbo poskusov. Seznanijo se z dodatnimi navodili, ki so lahko priložena ali pa jih ustno poda voditelj vaje. Sledi začetek izvajanja poskusov z ustreznim zaporedjem postopkov. Najprej vezava tokokrogov in instrumentov (pri izklopljenem napajanju) po navodilih in shemah v skripti, obvezna kontrola demonstratorja in njegovo dovoljenje za vklop. Izvedba opazovanj, meritev, odčitavanje in zapisovanje rezultatov. Ob koncu poskusa izklop napajanja, izklop instrumentov in razvez tokokrogov. Za morebitne nejasnosti sta ves čas na razpolago demonstrator in voditelj vaje.

Dodajmo še nekaj splošnih navodil za delo v laboratoriju. Zaradi zagotavljanja enakih možnosti opravljanja vaje in zavoro omejenih sredstev za vzdrževanje in razvoj vaj naprošamo študente, da z merilnimi instrumenti in opremo ravnajo pazljivo in odgovorno ter jo čuvajo pred električnimi in mehanskimi poškodbami. Pri nejasnostih glede dela z opremo naj študentje poiščejo pomoč pri demonstratorju. Pri uporabi univerzalnih instrumentov je potrebno že med samo vezavo, še pred kontrolo demonstratorja, izbrati ustrezno vrsto merjene količine in izbrati pravilno merilno območje. Če to ni podano v navodilih, začnemo z najvišjim območjem, ki ga postopoma znižujemo do najprimernejšega. Merilne instrumente in vezne žice je nujno potrebno razporediti pregledno, s čim manj prepletanja in križanja, kar omogoča enostavno kontrolo vezja in odčitavanje merilnih rezultatov. Potrebno je poskrbeti za zanesljive kontakte na spojnih mestih, ker zaradi slabih spojev najpogosteje prihaja do napak in vnosov nepravilnosti pri merjenju. Za čim večjo preglednost so na razpolago vezi v različnih barvah.

2.3. Izračuni in odgovori na vprašanja

Študentje po merjenju v laboratoriju izvedejo tudi pripadajoče izračune. Rezultate in opažanja vpišejo v predviden prostor v skripti, grafične odvisnosti pa vrišejo v pripravljene diagrame. Odgovorijo na vprašanja, ki jih vzpodbudijo k razmišljanju in diskusiji s kolegi. Primerjajo izmerjene in izračunane vrednosti in utemeljijo morebitna odstopanja. Ob koncu oddajo v celoti izpolnjeno poročilo voditelju vaje v pregled in potrditev.

3. Organizacija in izvedba vaj

Opravljenе laboratorijske vaje so pogoj za opravljanje izpita iz predmeta Osnove elektrotehnike II. Potrebno je izvesti vse predpisane laboratorijske vaje. Med delom v laboratoriju voditelj vaje ocenjuje delo študentov. Ocena laboratorijskih vaj se upošteva pri končni oceni iz predmeta Osnove elektrotehnike II.

Zaradi velikega števila študentov prvega letnika je pomembno dosledno spoštovanje pravil za organizacijo in izvedbo vaj. Vaje je potrebno opravljati v okviru svoje skupine v času, ki je predviden za to skupino. Delo v laboratoriju traja dve šolski uri (brez odmora). V tem času je potrebno opraviti vse elemente in postopke, ki so za vajo predvideni v skripti. Torej izvesti praktične eksperimente v laboratoriju, opraviti izračune, narisati diagrame in odgovoriti na zastavljena vprašanja. V laboratorij je treba priti točno ob navedenem času v svojo skupino, da je mogoče opraviti vse predvidene naloge. S seboj je treba prinesiti skripto za vaje, zapiske iz priprav in predavanj ter pribor, potreben za pisanje, risanje in računanje. Slike in diagrame se rišejo z ravnilom in šestilom, merilni rezultati se vpisujejo v skripto jasno, pregledno in izključno s svinčnikom, lahko pa v različnih barvah.

Pri poskusih imamo včasih opravka s količinami (električni tok, električno polje), ki so lahko ob neustreznem ravnanju življenjsko nevarne. Eno izmed vodil pri snovanju in razvoju poskusov je bilo, da se čim bolj izločijo morebitne nevarnosti. Zato je kakršnokoli dotikanje elementov vklopljenega tokokroga prepovedano. Dodatna opozorila in navodila za varno rokovanje študentje preberejo pri opisu posameznih eksperimentov ter prejmejo od voditelja vaje in demonstratorja in so jih dolžni upoštevati. Za poškodbe, ki bi nastale zaradi nespoštovanja navodil, prevzema študent polno odgovornost.

4. Vloga in pomen skripte za vaje

Primaren namen skripte je podajanje navodil za izvedbo laboratorijskih vaj. Njena sestava je določena s predstavljenim konceptom vaj. Za večjo preglednost imajo poglavja posamezne razdelke označene z grafičnimi ikonami, ki izkazujejo njihovo tematiko. Poglavja se pričnejo z razdelkom »iz prakse«, kjer skušamo osvetliti praktično uporabnost tematike eksperimenta in na ta način motivirati študenta za študij obravnavane tematike. Sledi razdelek s teoretsko osnovo s področja obravnavane teme, ki naj služi kot priročnik za osvežitev in hiter dostop do potrebnih znanj; obširnejša razlaga je v poglavjih iz literature, navedeni za tem. Razdelek s pripravo navadno vsebuje računsko nalogo, ki sovпада s praktičnim primerom iz eksperimentov ter nekaj vprašanj za razmislek. V zadnjem razdelku je opis poskusa skupaj z navodili in postopki za izvedbo. Opisana je oprema in merilni instrumenti. Posebej je označen trenutek, ko mora – pred vklopom – vezje preveriti demonstrator ali voditelj vaje. Za čim lažje in čim bolj učinkovito delo, zadnja dva razdelka vsebujeta ustrezna mesta za vpis rezultatov in izračunov ter vris grafičnih odvisnosti. S tega vidika je skripta delovni zvezek. V prilogi ob koncu skripte so obširneje predstavljene nekatere komponente merilne opreme.

Za boljšo preglednost so posamezni razdelki označeni z ikonami:

-  - literatura,
-  - izračuni,
-  - grafične odvisnosti,
-  - vezje naj preveri demonstrator ali voditelj vaje,
-  - vprašanja,
-  - razmislek.

Vaja 1:

Magnetno polje

1. Obravnavana tematika

Uporaba Hallovega pojava za merjenje gostote magnetnega pretoka v in izven osi kratke tuljave – ovoja velikega polmera, dveh soosnih kratkih tuljav – Helmholtzovega para ter dolge tuljave majhnega polmera (solenoida). Ugotavljanje vpliva feromagnetnega materiala na magnetno polje. Uporaba Teslametra, naprave za zajem podatkov (DAQ – data acquisition), računalnika in pripadajoče programske opreme za zajem in prikaz merilnih rezultatov.

2. Iz prakse

Če je vodnik s tokom izpostavljen prečnemu magnetnemu polju, zaradi sile na gibajoče se naboje v magnetnem polju pride do prerazporeditve le teh. Posledica tega je padec napetosti med bočnima stranema vodnika, ki jo imenujemo Hallova napetost, pojav pa Hallov efekt. Edwin Hall je odkril ta pojav leta 1897, ko je bil star 24 let in je delal doktorat na univerzi John Hopkins (ZDA). Hallov pojav se najpogosteje uporablja v elementih za zaznavanje in merjenje magnetnega polja in posredno tudi električnega toka. Občutljivost teh elementov, običajno izvedenih v polprevodniški tehniki, je reda velikosti $10 \mu\text{T}$. Odlikujejo se po linearnosti, njihove prednosti so tudi neobčutljivost na svetlobo, prah, vlago, itd. Inštrument za merjenje gostote magnetnega pretoka, ki običajno izkorišča zgoraj predstavljeni Hallov efekt, imenujemo Teslameter, v praksi pogosto tudi Gaussmeter, saj je bila predhodno merska enota za gostoto magnetnega pretoka poimenovana po Gaussu ($1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gauss}$). V našem primeru bomo uporabljali sonde, ki vsebujejo Hallov element Siemens KSY 14. Te elemente se pogosto uporablja tudi za aplikacije, ki zahtevajo brezkontaktno določanje pozicije, merjenje hitrosti vrtenja, merjenje toka, itd. S podobnimi elementi so opremljeni tudi sodobni (tablični) telefoni.

V magnetizmu eno od temeljnih tokovni struktur predstavlja tokovna zanka (krožna). Za polje v osi tokovne zanke je znana analitična rešitev, za večje razdalje od tokovne zanke pa obstaja enostavna analitična aproksimacija za polje v poljubni točki. Majhno tokovno zanko pogosto imenujemo tudi magnetni dipol. S konceptom magnetnih dipolov razložimo magnetne lastnosti snovi.

S Teslametrom bomo ugotavljali polje v okolici ene ali dveh kratkih tuljav z večjim polmerom, katerih polje bomo analitično opisali s poljem tokovnih zank. V praksi je posebno zanimiv primer uporabe dveh soosnih med seboj razmaknjenih kratkih tuljav večjega polmera. Takemu paru rečemo Helmholtzov par (po nemškemu fiziku Hermanu von Helmholtzu). Če sta tuljavi enaki in razmaknjeni za razdaljo enako polmeru tuljav, je magnetno polje v sredini med

tuljavama dokaj homogeno. Homogeno magnetno polje pa je v praksi sicer težko realizirati (magnetno polje je v osnovi vrtnično), še posebno tako, ki je relativno lahko dostopno. Zato se Helmholtzov par tudi v praksi zelo pogosto uporablja za različne meritve ali umerjanja, ki jih je potrebno opraviti v homogenem magnetnem polju.

Tudi daljša tanjša tuljava z večjim številom ovojev (imenujemo jo tudi solenoid) je v elektrotehniki pomemben element. Odlikuje jo relativno velika induktivnost, torej zmožnost shranjevanja magnetne energije. Ta se še posebej poveča, če v notranjost tuljave dodamo feromagnetni vložek ali še bolje, če ta vložek zaključimo tudi v zunanosti tuljave. S tem sicer precej povečamo induktivnost tuljave, a običajno hkrati poslabšamo frekvenčne karakteristike takega elementa, saj sta za feromagnetike značilna pojav histereze in nelinearnosti. V praksi se solenoid pogosto uporablja kot pretvornik električne energije v mehansko, kot npr. elektromagnetni ventil.

Uporaba računalnika pri opravljanju meritev in analizi merilnih rezultatov je vedno bolj pogosta in nujna. Mnogo merilnih naprav omogoča neposredno povezavo z računalnikom. Ta je lahko brezžična (npr. WiFi ali Bluetooth povezava) ali pa fizična (npr. s paralelnim, serijskim, USB ali Ethernet vodikom). Teslometer, ki ga bomo uporabili, ima analogen napetostni izhod, ki je sorazmeren merjeni gostoti magnetnega pretoka. Tega priključimo na napravo za zajem podatkov, ki je pogosto znana kot DAQ (Data Acquisition Device). Te naprave omogočajo merjenje več napetosti hkrati in imajo običajno več analognih in nekaj digitalnih vhodov hkrati. Razlikujejo se predvsem po hitrosti in natančnosti vzorčenja. V našem primeru bomo uporabili nekoliko manj zmogljivo, a zato dovolj ceneno DAQ napravo podjetja National Instruments NI 6009. Na računalnik je povezana z USB vodikom. Ima 8 analognih 14 bitnih vhodov z maksimalno frekvenco vzorčenja 48000 vzorcev na sekundo (48 kS/s), 2 analogna izhoda (12 bit, 150 S/s) ter 12 digitalnih vhodov ali izhodov. Vrednosti vhodnih signalov morajo biti manjše od 10 V, lahko jih uporabimo v diferencialnem načinu (differential) ali z eno ozemljeno sponko (single ended).

Za zajem podatkov v računalnik preko naprave DAQ potrebujemo ustrezen računalniški program. Proizvajalci DAQ kartic običajno ponudijo svoje programske rešitve, lahko pa ponudijo le gonilnike, ki nato omogočajo integracijo naprav z aplikacijami napisanimi v različnih programskih jezikih (C++, Visual Basic, C#, Matlab, ...). Mi bomo uporabili aplikacijo, narejeno s programskim orodjem LabView. To je zmogljivo programsko orodje podjetja National Instruments, ki je zelo dobro prilagojeno uporabi NI DAQ naprav, in se v praksi pogosto uporablja za hitro realizacijo in integracijo merilnega sistema.



3. Viri

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, razdelki 1, 2, 4 – 6.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja V.40, V.41, V.44 - V.48.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, poglavji §28, §30.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 5.3 - 5.9, 5.14.4, 5.22 – 5.27.
- [5] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II – Magnetika, poglavja 3 do 5.
- [6] Križaj D.: <http://lbm.fe.uni-lj.si/dejan/OE/OE.html>
- [7] Predavanja.
- [8] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 3.1, primera m4 in m5.
- [9] <http://oe.fe.uni-lj.si/>, gradivo za laboratorijske vaje, OE II, vaja 1: Magnetno polje krožnega ovoja in Magnetno polje dolge tanke tuljave.
- [10] Aplikacije s Hallovimi senzorji:
<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/technical/hallbook.pdf>
<http://www.fh-jena.de/~endter/Schaltungssimulation/Herstellerinformation-%20KSY%2014.pdf>
- [11] National instruments, program in DAQ naprava:
<http://www.ni.com/academic/>,
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201987>
- [12] Helmholtzov par. Viri na internetu. Ključne besede: Helmholtz pair, coils, measurements
- [13] Solenoidi: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solenoid>

4. Priprava

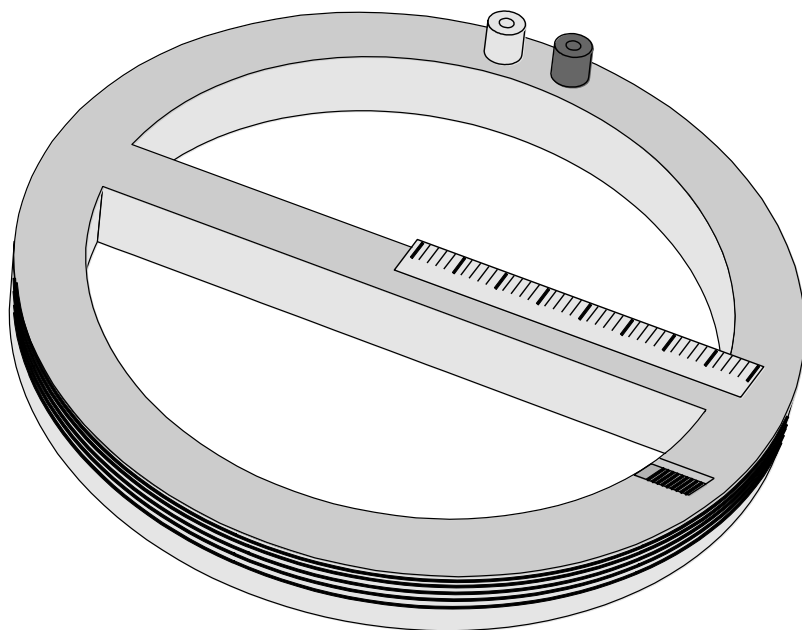
Napotek

Za izris grafov pri nalogah lahko uporabite poljuben računalniški program, predlagamo pa uporabo programa Matlab (ali ene od brezplačnih različic tega programa – npr. Octave) oz. Mathematica. Na spletni strani¹ najdete napotke in nasvete v zvezi z uporabo programa ter tudi kodo, ki omogoča izračun polja v ravnini kratke tuljave.

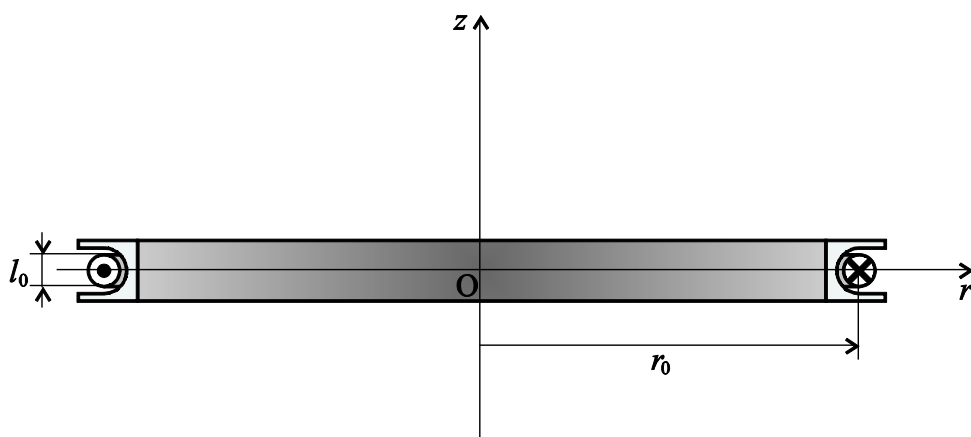
Naloga 1

Kratka tuljava dolžine $l_0 = 0,9$ cm in polmera $r_0 = 15,5$ cm ima $N_0 = 100$ obojev. Zaradi kratke dolžine l_0 tuljave v primerjavi z njenim polmerom r_0 jo pri izračunih upoštevajte kot en sam krožni ovoj, po katerem teče tok $N_0 I_0$.

1 <https://e.fe.uni-lj.si/>. Osnove elektrotehnike II. Gradivo za 1. laboratorijsko vajo: Uporaba računalnika za risanje grafov.
<https://e.fe.uni-lj.si/>. Osnove elektrotehnike II. Gradivo za 1. laboratorijsko vajo: Izračun magnetnega polja v ravnini kratke tuljave oz. krožne tokovne zanke.
http://lane.fe.uni-lj.si/oe/lab/oe2_vaja1.htm; na slednji se v nekaterih verzijah Microsoft Internet Explorerja na levem robu ne prikaže izbirni meni. V tem primeru izberite brskalnik Chrome, Firefox ali Opera.



Kratka tuljava (ovoj).



Kratka tuljava (ovoj) v prerezu.

1. Zapišite enačbo za polje na osi kratke tuljave, ki jo aproksimiramo s krožno tokovno zanko ter dodajte opis spremenljivk in skico.

Enačba, skica, opis:

2. Izračunajte vrednosti gostote magnetnega pretoka v središču kratke tuljave za podane parametre pri povečevanju toka v ovojih od 0 do 1 A s korakom po 0,1 A. Izpišite tabelo izračunanih vrednosti in izrišite graf odvisnosti gostote pretoka v središču od toka. Pri tem uporabite ustrezno programsko orodje.

Slika: Gostota magnetnega pretoka v središču kratke tuljave v odvisnosti od toka v ovojih.

3. Izrišite graf gostote magnetnega pretoka v osi kratke tuljave za tok v ovojih 1 A s središčem pri $z = 0$ od $z = -13$ cm do $z = +27$ cm s korakom po 1 cm.

Slika: Gostota magnetnega pretoka vzdolž osi kratke tuljave.

4. Fakultativno: izrišite potek gostote magnetnega pretoka $B(r)$ v ravnini kratke tuljave s podatki iz naloge 1. Pri tem si pomagajte s programom `polje_precno.m`, ki za delovanje potrebuje še program `polje.m` in izračuna polje z numerično integracijo posameznih prispevkov tokovnih elementov krožne zanke. Oba programa dobite na spletni strani. Sami določite potrebne in ustrezne parametre za izračun in izris grafa. Lahko si pomagate tudi s programom *Izračun magnetnega polja v ravnini kratke tuljave oz. krožne tokovne zanke* (na naslovu <https://e.fe.uni-lj.si/>; Osnove elektrotehnike II; Gradivo za 1. laboratorijsko vajo), kateri omogoča določanje polja v ravnini kratke tuljave na dva različna načina.

Slika: Gostota magnetnega pretoka v ravnini kratke tuljave.

Naloga 2

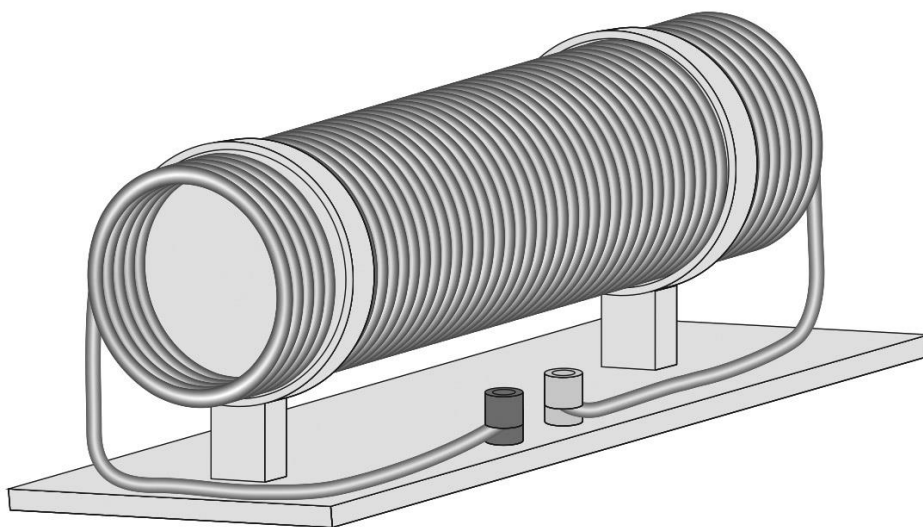
1. Dve kratki tuljavi s podatki iz naloge 1 sta soosni. Leva ima središče pri $z = 0$ cm, desna pa pri $z = 10,3$ cm. Izrišite polje v osi tuljav od $z = -13$ cm do $z = 27$ cm (korak 1 cm) za vsako tuljavo posebej in skupno polje obeh tuljav. V tuljavah je tok 1 A in je v obeh tuljavah usmerjen v isto smer. (Nasvet: zapišite funkcijo $B(z)$, ki izračuna vrednost polja v oddaljenosti z od središča tuljave pri $z = 0$ cm, nato za drugo tuljavo upoštevajte premaknitev središča tuljave po z osi z $B(z - 0,103 \text{ m})$).

- Slika: Gostota magnetnega pretoka vzdolž osi dveh soosnih kratkih tuljav.
2. Izrišite graf odvisnosti gostote magnetnega pretoka vzdolž osi za dve soosni kratki tuljavi s središčema pri $z = 0$ cm in $z = 15,5$ cm od $z = -13$ cm do $z = 27$ cm (korak 1 cm). Paru tuljav, ki imata polmer tuljav enak razmiku med tuljavama, pravimo Helmholtzov par. V isti graf narišite še polje v osi tuljav, če je desna tuljava odmaknjena od leve za 5,5 cm in če je odmaknjena za 20,5 cm.

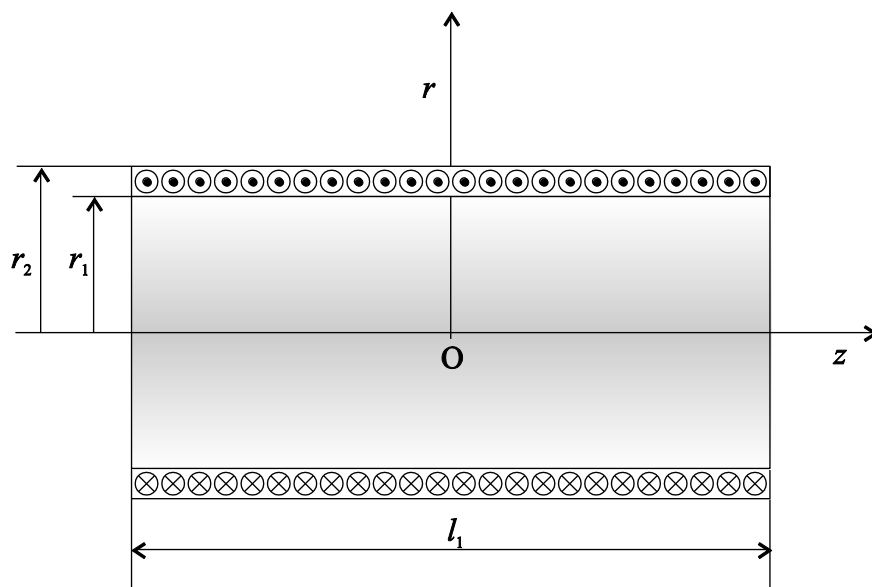
Slika: Gostota magnetnega pretoka vzdolž osi para dveh kratkih soosnih tuljav za tri različne razmike med tuljavama.

Naloga 3

Dolga tuljava dolžine $l_1 = 16$ cm, notranjega polmera $r_1 = 11$ mm in zunanjega $r_2 = 16$ mm, ima $N_1 = 2000$ ovojev po katerih teče enosmerni tok $I_1 = 0,6$ A. Zaradi majhne debeline plasti tuljave ($r_2 - r_1$) v primerjavi z njeno dolžino l_1 pri izračunih predpostavite, da je polmer vseh ovojev enak srednjemu polmeru tuljave $r_s = (r_1 + r_2) / 2$.



Dolga tuljava.



Dolga tuljava v prerezu.

1. Zapišite enačbo za izračun gostote magnetnega pretoka vzdolž osi dolge tuljave ter opišite in vpišite v ustrezno skico parametre, ki nastopajo v enačbi.

Enačba, skica, opis:

2. Izrišite graf poteka gostote magnetnega pretoka vzdolž osi dolge tuljave od $z = 0$ cm do $z = 15$ cm s korakom po 1 cm.

Slika: Gostota magnetnega pretoka vzdolž osi dolge tuljave.

3. Narišite graf spreminjanja gostote magnetnega pretoka vzdolž osi dolge tuljave za tri različne dolžine tuljave: za $l_1 = 5, 10$ in 20 cm. Ostali podatki naj ostanejo nespremenjeni.

Slika: Gostota magnetnega pretoka vzdolž osi dolge tuljave za tri različne dolžine tuljave.

- 14

5. Delo v laboratoriju

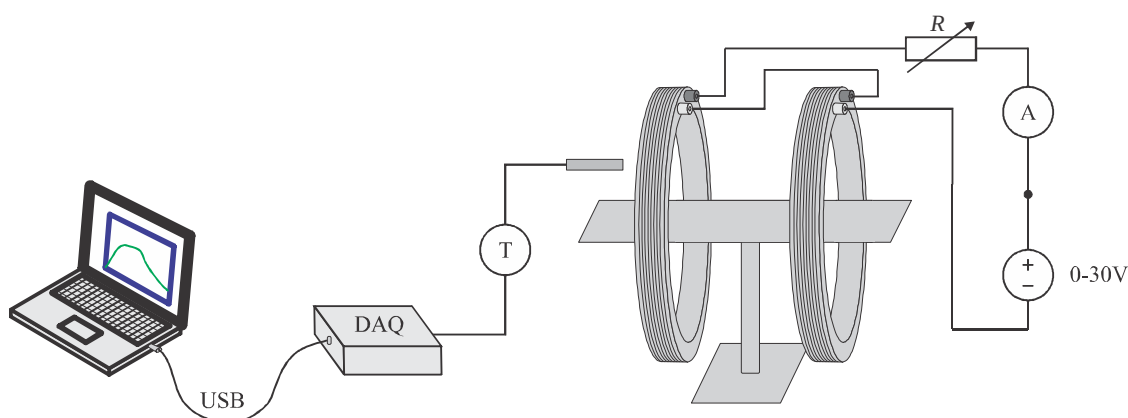
5.1. Cilji

1. izvesti merjenje magnetnega polja s Teslametrom s Hallovo sondo,
2. uporabiti napravo za zajem podatkov (DAQ - Data Acquisition),
3. uporabiti program Octave, Matlab, Mathematica ali podobno za obdelavo podatkov – izrise in izračune,
4. izmeriti in analizirati gostoto magnetnega pretoka v okolici ene in dveh kratkih tuljav (Helmholtzov par),
5. izmeriti in analizirati polje v okolici dolge tuljave – solenoida,
6. primerjati izmerjene rezultate z analitičnimi in razumeti vzroke za razlike.

5.2. Merilni pribor

1. kratki tuljavi,
2. dolga tuljava,
3. mizica (nastavek) za merjenje,
4. ampermeter,
5. prenosni računalnik,
6. naprava DAQ za zajem podatkov (NI 6009),
7. Teslameter s Hallovo sondo,
8. drsni upor,
9. ravnilo in palica s feromagnetnima valjema.

5.3. Merilna shema



5.4. Navodilo za delo v laboratoriju

V prvem delu vaje merimo magnetno polje v okolici kratke tuljave (ovoja): izmerimo gostoto magnetnega pretoka na osi in v ravnini kratke tuljave in narišemo pripadajoče diagrame. Izmerimo tudi velikost komponent gostote magnetnega pretoka v točkah izven ravnine in izven osi kratke tuljave. Izmerimo še velikost komponente polja po izbranih linijah za dve soosno postavljeni tuljavi.

V drugem delu vaje merimo magnetno polje toka dolge tuljave: izmerimo gostoto magnetnega pretoka v osi dolge tuljave in narišemo pripadajoči diagram. Ugotavljamo tudi vpliv feromagnetnega telesa (materiala) na spremembo magnetnega polja v tuljavi.

Opozorilo: s Teslometrom vedno merimo le komponento polja, ki je v smeri osi merilne sonde.

Možni tehnični problemi: nekaj možnih težav pri delu z računalnikom in načinov reševanja le-teh je opisanih na strani 23.

Vzpostavitev merilnega okolja

1. V utore na merilni mizici namestite dve kratki tuljavi kot prikazuje merilna shema. Ne glede na namestitev tuljave bo pri posameznih meritvah potrebno zagotoviti ustrezno smer toka v njih.
2. Vklopite in kalibrirajte Teslometer po navodilu v prilogi 1.4., stran 79. Teslometer priključite na napravo za zajem podatkov (DAQ). Ta je prednastavljena tako, da omogoča merjenje signala (rdeča sponka) glede na zemljo (črna sponka). Povežite sponke v puše enakih barv ob strani Teslometra. DAQ priključite na računalnik preko USB povezave.
3. Vklopite prenosni računalnik (zagon v okolju Windows) ter se pomaknite v mapo OE2_vaje, ki se nahaja na namizju. V mapi je program za izvajanje meritev (Meritve_Graf), datoteke z nastavitvami za posamezne meritve ter datoteka za shranjevanje rezultatov meritev.

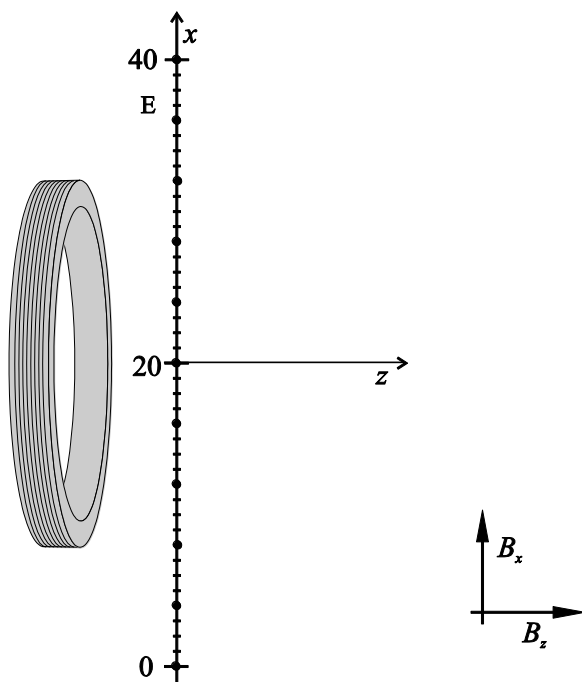
Merjenje odvisnosti magnetnega polja od toka v tuljavi (Graf 1)

1. Tuljavo vstavite v ležišče 2 in jo povežite z inštrumenti kot kaže merilna shema. Enosmerni napetostni vir naj bo priključen preko ampermetra (v pušo za merjenje v merilnem območju amperov) in (drsne) upora, na katerem nastavite upornost približno $10\ \Omega$. Na ampermetru je potrebno ročno nastaviti merilno območje na ampere.
2. Po dovoljenju demonstratorja vključite napajanje. Vklopite napetostni vir in nastavite napetost (tok) na 0 V (A).
3. Sondo Teslometra postavite (približno) v središče tuljave v smeri osi tuljave. Na Teslometru nastavite merilno območje na 2 mT.
4. Zaženite program Meritve_Graf in v izbirnem meniju izberite nastavitve_Graf1.
5. Izvedite meritve s povečevanjem toka od 0 do 1 A s korakom 0,1 A. To izvedete tako, da povečujete tok do zelene vrednosti (preverite na

priključenem ampermetru) in ob pritisku na tipko **Ena meritev** v programu izvedete eno meritev, ki se nato prikaže na grafu. Opravite meritve za vse prednastavljene vrednosti. Če se pri določeni meritvi zmotite (npr. ne nastavite pravilnega položaja sonde Teslametra), lahko s pritiskom na tipko **Izbriši** odstranite zadnjo meritev (ali s ponovitvami več zadnjih meritev).

6. Sondo Teslametra postavite na poljubno drugo mesto v bližini priključene tuljave, v programu kliknite **Naslednji graf** in ponovite meritve od 0 do 1 A po 0,1 A.
7. Po opravljenih meritvah izklopite vir in shranite graf v datoteko za shranjevanje rezultatov. To opravite s klikom na gumb **Vstavi sliko** in izbiro meritve (*Graf1_polje_tok*). Program bo sam vstavil graf na ustrezno mesto v pripravljeni datoteki.
8. V datoteki ustrezno dopolnite poročilo za to meritev. (To lahko naredite tudi ob koncu vaje ali pa doma).

Komponente magnetnega polja na liniji, prečni na os tuljave



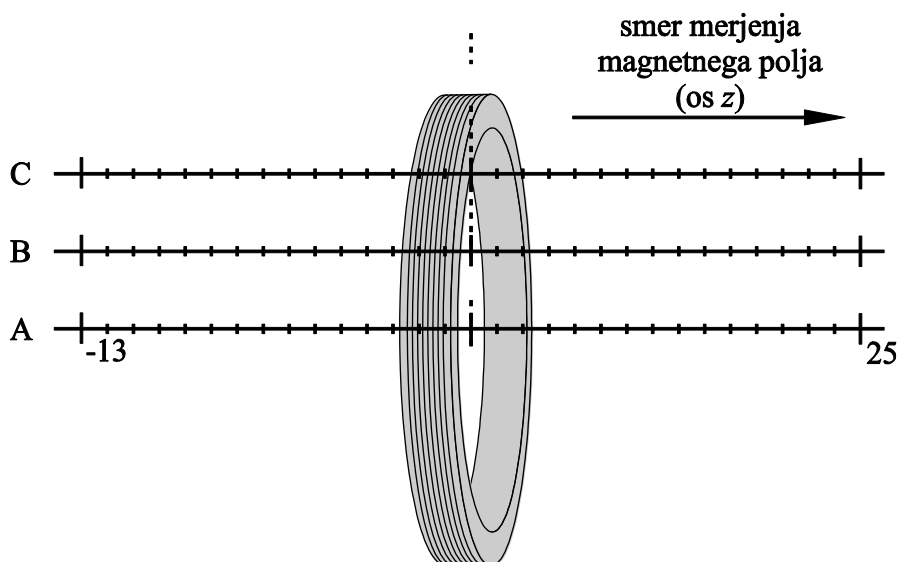
Merite komponenti gostote magnetnega pretoka v smeri osi z (B_z) in v smeri osi x (B_x) v točkah na liniji E in določite absolutne vrednosti gostote magnetnega pretoka in kóte med vektorji gostote magnetnega pretoka in osjo tuljave (osjo z):

1. Nastavite tok v tuljavi na 1 A.
2. Poravnajte ravnilo z linijo E. Na tej liniji merite ter zapisujte v tabelo vrednosti komponent polja B_z in B_x v 11-ih točkah na zgornji sliki (razmik med točkami je 4 cm). (Za večjo natančnost meritev je potrebno ravnilo natančno poravnati z linijo E ter pred meritvijo pri izklopljenem toku postaviti sondo v točko pri vrednosti $x = 20$ cm, obrniti sondo v smer osi x in nastaviti ničlo.)

x/cm	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
B_z/mT											
B_x/mT											
B_y/mT											
kót											

3. Domača naloga: Iz izmerjenih komponent polja izračunajte absolutne vrednosti vektorja gostote magnetnega pretoka in kóte med vektorji in osjo z. Izračunane vrednosti vpišite v tabelo.
4. Domača naloga: Iz podatkov v tabeli narišite na zgornji sliki vektorje gostote magnetnega pretoka v ustreznih točkah na liniji E. Pred začetkom risanja izberite ustrezno merilo in ga dopišite na sliko.

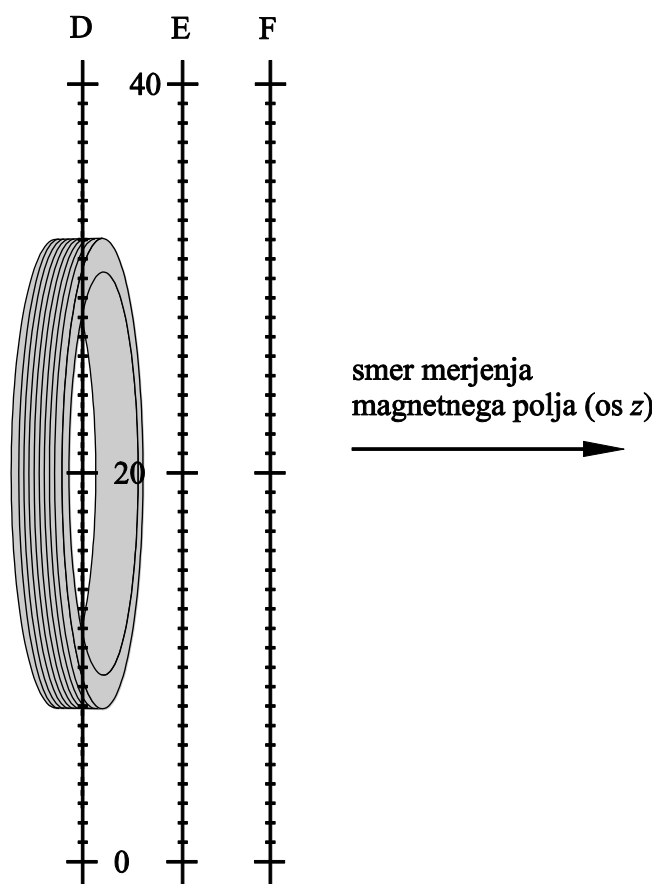
Magnetno polje v osi in vzporedno z osjo tuljave (Graf 2)



Merite komponento magnetnega polja (B_z) v smeri osi z (osi tuljave) pri toku 1 A po treh označenih linijah: A, B in C:

1. Nastavite tok v tuljavi na 1 A.
2. V programu Meritve_Graf izberite *nastavitev_Graf2*
3. Postavite sondo Teslametra vzdolž linije A na začetno pozicijo (–13 cm) in jo pomikajte vzdolž te linije po 1 cm in po vsakem pomiku opravite meritve s pritiskom na tipko **Ena meritev**. Enako opravite meritve še po linijah B in C.
4. Dodatno (neobvezno): shranite izmerjene vrednosti v datoteko in (doma) naredite primerjavo med analitično izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi. To naredite tako, da kliknete na gumb **Shrani v txt** (tekstovno datoteko) ter si izberete ime in mapo za shranitev rezultatov meritev.
5. Po opravljenih meritvah shranite graf v dokument z rezultati s klikom na tipko **Vstavi sliko** in izbiro *Graf2_polje_z*. V datoteki z rezultati odgovorite na dodatna vprašanja v zvezi z opravljeno meritvijo.

Magnetno polje, prečno na os tuljave (Graf 3)



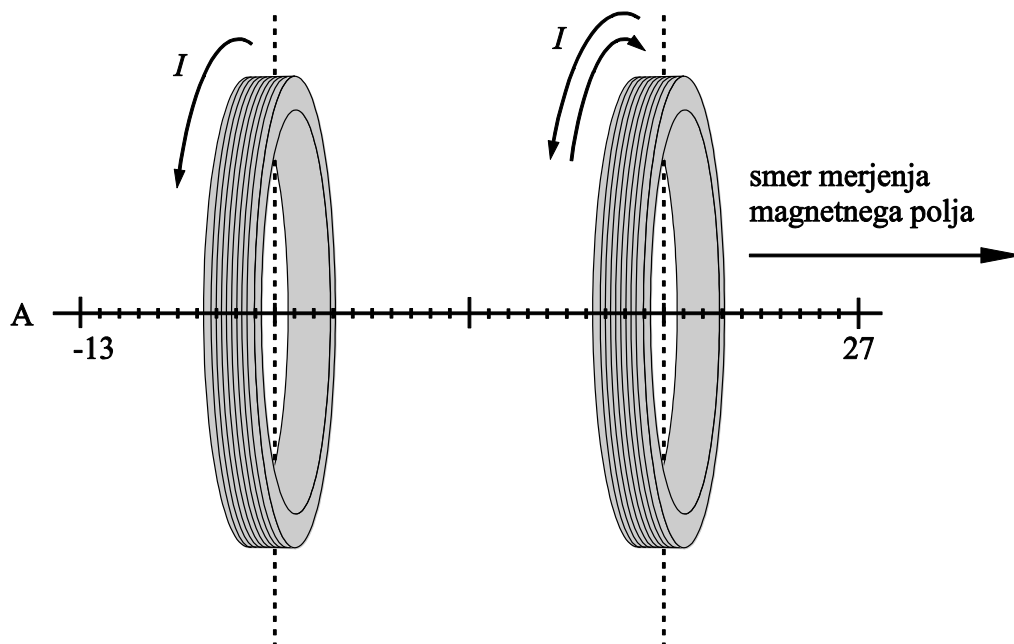
Merite komponento magnetnega polja, ki je v smeri osi z (osi tuljave) po linijah D, E in F, ki so postavljene prečno na os tuljave. Tok v tuljavi naj bo 1 A:

1. V izbirnem meniju izberete *nastavitve_Graf3* in nastavite ravnilo vzdolž linij D, E in F, pri čemer sredino ravnila poravnajte z osjo tuljave. Po izvedenih meritvah shranite graf v datoteko z rezultati (*Graf3_polje_r*) ter ustrezno dopolnite tekst.

Magnetno polje v okolici dveh soosnih kratkih tuljav – Helmholtzov par

Izklopite napajanje, vstavite tuljavi v ležišči 2 in 4 ter ju povežite zaporedno. Po prevezavi in dovoljenju demonstratorja vklopite napajanje ter nastavite tok na vrednost 1 A.

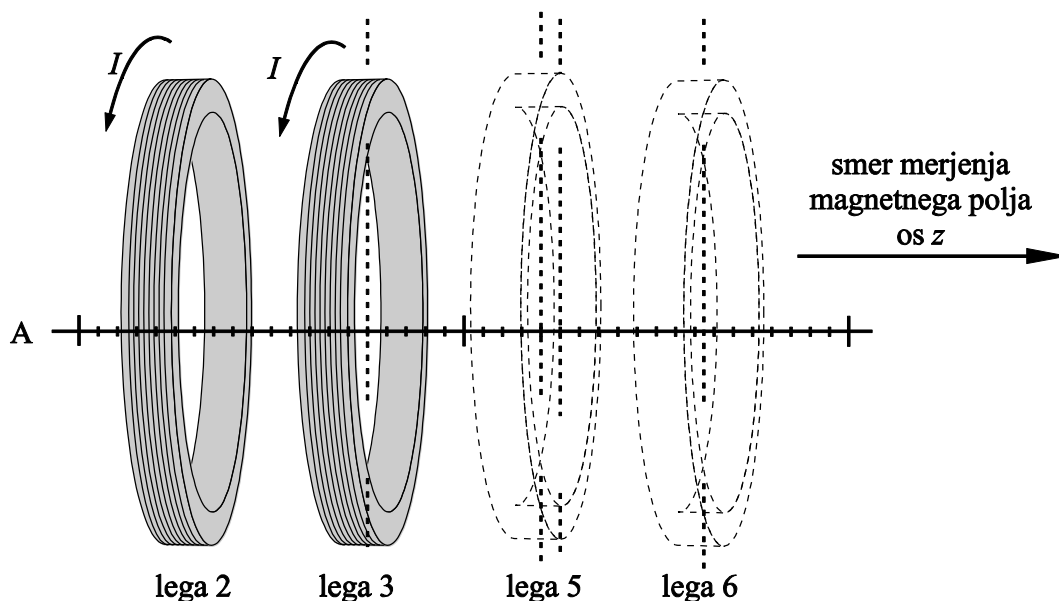
Magnetno polje v osi dveh kratkih tuljav za enako in nasprotno smer toka v tuljavah (Graf 4)



Merite vpliv smeri toka v tuljavah na polje v osi tuljav:

1. Izmerite vrednosti magnetnega polja v osi tuljav (linija A) tako, da je enkrat tok v tuljavah usmerjen v isto smer in drugič v nasprotno smer. V programu izberite nastavitve *nastavitve_Graf4*. Meritve izvedite za celotno merilno območje po liniji A. Po izvedenih meritvah shranite graf v datoteko z rezultati (*Graf4_polje_Iz*) ter v datoteki ustrezno dopolnite tekst.

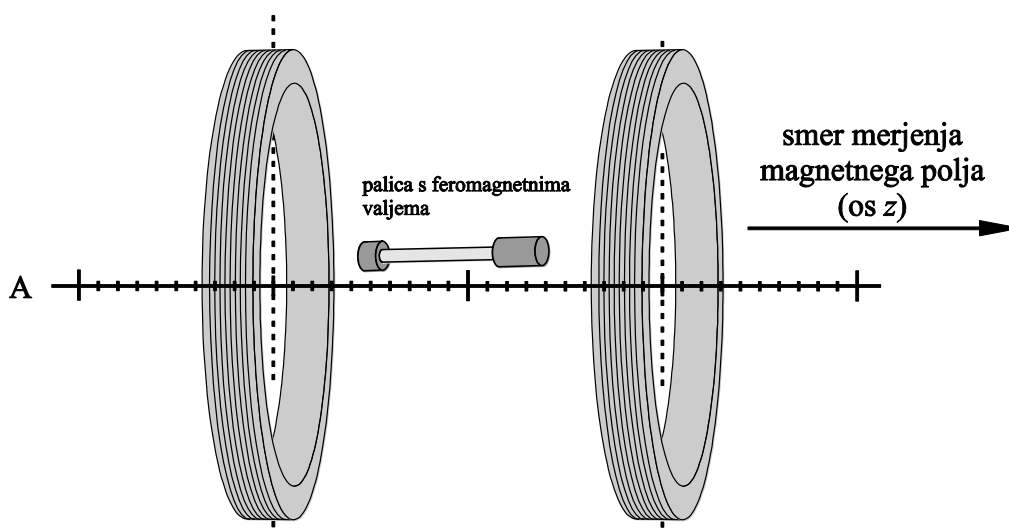
Magnetno polje v osi dveh kratkih tuljav za različne razdalje med tuljavama in tokom v isto smer (Graf 5)



Merite vpliv razdalje med tuljavama na polje v osi tuljav:

1. Izmerite vrednosti magnetnega polja v osi dveh tuljav (linija A) za razdalje med tuljavama $d = 5,5$ cm, $15,5$ cm in $20,5$ cm tako, da levo tuljavo obdržite v ležišču 2, desno pa za prvo razdaljo postavite v ležišče 3, za drugo v ležišče 5 in nato še v ležišče 6. Tok v tuljavah naj bo usmerjen v isto smer in jakosti 1 A. V programu izberite *nastavitve_Graf5* in izvedite meritve.
2. Dodatno (neobvezno): po opravljeni meritvi shranite izmerjene vrednosti v datoteko in (doma) naredite primerjavo med analitično izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi.
3. Po izvedenih meritvah shranite graf v datoteko z rezultati (*Graf5_polje_d*) ter ustrezno dopolnite tekst.

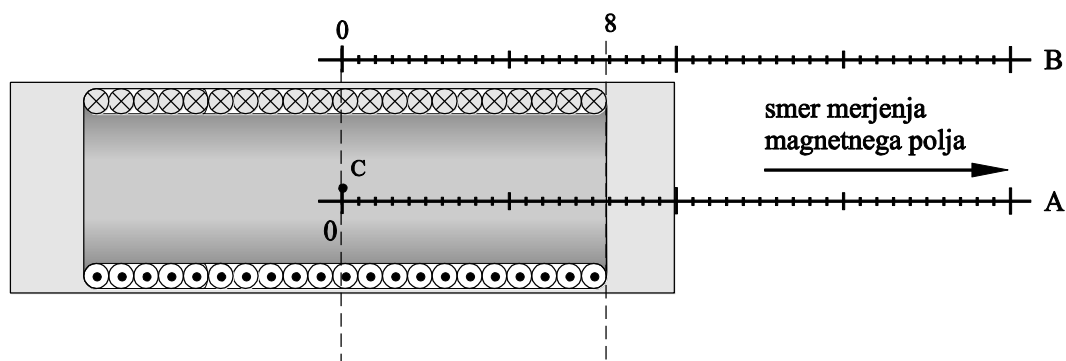
Magnetno polje v osi dveh kratkih tuljav ob vstavitvi feromagnetika (Graf 6)



Merite vpliv feromagnetika na magnetno polje dveh tuljav:

1. Tuljavi postavite v ležišči 2 in 4. Tok v tuljavah naj bo usmerjen v isto smer in velikosti 1 A. V programu izberite *nastavitve_Graf6*. Izmerite vrednosti magnetnega polja v osi dveh tuljav (linija A). Med tuljavama naj ne bo palice s feromagnetnima valjema.
2. Med tuljavi blizu osi položite palico s feromagnetnima valjema in ponovite meritve vzdolž osi.
3. Po izvedenih meritvah shranite graf v datoteko z rezultati (*Graf6_polje_Fe*) ter ustrezno dopolnite tekst.

Magnetno polje v notranjosti dolge ozke tuljave (Graf 7)



Merite komponento polja v smeri osi z dolge tuljave:

1. Odstranite merilno mizico s Helmholtzovim parom in povežite dolgo ozko tuljavo s prej izklopljenim napajalnim virom. Po dovoljenju demonstratorja vključite napajanje. Ponovno uporabite program Meritve_Graf in izberite nastavitve *nastavitve_Graf7*.
2. Preklopite Teslameter na merilno območje 20 mT.
3. Nastavite tok na 0,6 A in izmerite vrednosti magnetnega polja vzdolž linije A tako, da postavite sondo v središče tuljave (točka C) in jo pomikate po 1 cm v smeri zunanosti. Ko je sonda v točki C (0 cm), prikazuje merilo, ki je vgrajeno na tulec sonde, na robu tuljave vrednost 9 cm.
4. Položite (prevrnite) tuljavo na mizo in poleg ovojev postavite merilno podlogo ali priloženo ravnilo tako, da boste ponovili meritve v zunanosti tuljave (po liniji B na sliki).
5. Dodatno (neobvezno): po opravljeni meritvi shranite izmerjene vrednosti v datoteko in (doma) naredite primerjavo med analitično izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi polja v osi tuljave.
6. Graf z izmerjenimi vrednostmi vnesite v datoteko z rezultati (*Graf7_polje_dolga*) ter ustrezno dopolnite tekst.

Polje v notranjosti dolge ozke tuljave ob vstavitvi feromagnetne palice v notranjost tuljave (Graf 8)

1. Postavite sondo približno v sredino dolge tuljave (točka C). V programu s seznama izberite *nastavitev_Graf8*. Z druge strani tuljave potisnite palico s feromagnetnima valjema z daljšim feromagnetnim valjem v tuljavo do sonde.
2. Na Teslametru izberite merilno območje 200 mT.
3. Izmerite prvo vrednost ter nato še druge pri izvlačenju palice iz tuljave po 0,5 cm. Pri tem si pomagajte z ravnilom, ki ga položite ob feromagnetni palici.
4. Ponovite meritev še z vstavljenim krajšim feromagnetnim valjem.
5. Graf z izmerjenimi vrednostmi vnesite v datoteko z rezultati (*Graf8_polje_dolga_Fe*) ter ustrezno dopolnite tekst.

Ob zaključku:

1. Shranite datoteko z rezultati ter jo skopirajte na svoj USB ključek. Če je računalnik priključen na internet, lahko uporabite elektronsko pošto. V kolikor ste med meritvami shranili tudi izmerjene vrednosti v tekstovne datoteke, si shranite tudi te za nadaljnjo obdelavo.
2. Izklopite napajanje, razvežite inštrumente ter jih razporedite približno tako, kot so bili postavljeni na začetku.
3. Doma dopolnite manjkajoče odgovore in komentarje, naredite primerjavo izmerjenih vrednosti in analitično izračunanih ter natisnite končno verzijo poročila. Poročilo priložite v vašo skripto.

Možni zapleti:

Pri delu z računalniki in merilno opremo je vedno možno, da pride do določenih nepredvidenih težav. Spodaj je navedenih nekaj najbolj pogostih možnih težav in predlagan način reševanja le-teh:

1. Lahko se zgodi, da se datoteka za vpis rezultatov ne odpre sama (običajno ob spremembi izbire v izbirnem meniju). V tem primeru lahko izmerjen graf vstavite v datoteko »ročno« tako, da s programom Snipping Tool (ki je nameščen spodaj v orodni vrstici ) izberete graf in ga kopirate in prilepite v dokument z rezultati.
2. Ko kliknete na gumb **Vstavi graf**, se graf prenese v datoteko z rezultati in hkrati izbriše v programu. Če želite predhodno shraniti izmerjene rezultate v tekstovno datoteko (za nadaljnjo obdelavo), morate to narediti pred tem s klikom na gumb **Shrani v txt**.
3. Če merilno območje na ordinati ne ustreza optimalno izmerjenim vrednostim, ga lahko preprosto spremenite z desnim klikom na grafu in izbiro AutoScale Y.
4. Če se zmotite pri meritvah in bi želeli začeti meritev znova, lahko kadarkoli izberete drugo nastavitev, s čimer se graf izbriše. Nato ponovno izberete ustrezno nastavitev in ponovite meritev. Če ste narobe izmerili le nekaj meritev in ne celega grafa, lahko zadnje meritve zbrisete (undo) s klikom na gumb **Izbriši**.
5. Če je potrebno, program omogoča spreminjanje vrste nastavitve s klikom na zavihek **Nastavitve** (levo zgoraj). Odpiranje zavihka je zaščiteno z geslom, zato lahko ta dela opravi le asistent.

5.5. Dodatna vprašanja:

1. Poleg Hellmholtzovega para tuljav obstaja nekaj drugih načinov za vzpostavitev homogenega magnetnega polja. Raziščite in predstavite vsaj enega od teh načinov.
2. Glede na izmerjene vrednosti magnetnega polja v okolici ene in dveh kratkih tuljav (Hellmholtzov par) skicirajte gostotnice magnetnega polja za ta dva primera.
3. Raziščite, zakaj se v praksi uporablja Hellmholtzov par in podrobneje opišite vsaj en primer uporabe.

Dodatni zapisi:



Vaja 2:

Feromagnetik v magnetnem polju

1. Obravnavana tematika

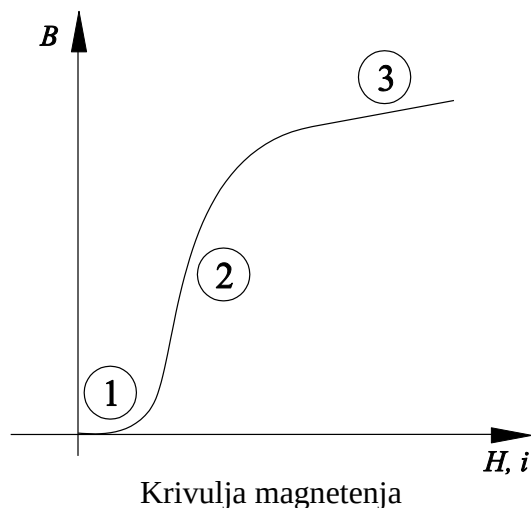
Feromagnetik v magnetnem polju, krivulja magnetenja, remanentna gostota, koercitivna poljska jakost, vpliv zračne reže v feromagnetnem jedru, histerezna zanka, gostota magnetnega pretoka v reži.

2. Iz prakse

Magnetno polje se opreda okoli električnega toka – je posledica gibanega električnega polja. Za magnetno polje ne obstajajo dobri izolatorji; obstaja pa skupina materialov, ki so zanj dobri prevodniki. To je skupina feromagnetikov. V elementarni obliki ima takšne lastnosti pet kemičnih elementov: železo (Fe), nikelj (Ni), kobalt (Co), gadolinij (Gd) in disprozij (Dy). Dobra prevodnost za magnetno polje je posledica njihove atomske strukture (vsak njihov atom je neke vrste elementarni magnetek) in skupinske usmerjenosti več skupin atomov v kristalu. Skupinska usmerjenost je bolj posledica zunanjega vpliva kot spontan pojav. Z zunanjim magnetnim poljem skupinsko usmerjenost povečamo; samodejno ali pod zunanjimi mehanskimi in/ali toplotnimi vplivi pa se skupinska usmerjenost zmanjša. Ko damo feromagnetni material v zunanje magnetno polje, se elementarni magnetki (atomi in skupine atomov) usmerijo tako, da podpirajo zunanje magnetno polje in skupno polje je močnejše. S povečevanjem zunanjega polja se vse več elementarnih magnetkov usmeri. Ko so usmerjeni vsi, prispevek feromagneta ne narašča več in pride do nasičenja. Potek odvisnosti med zunanjim poljem in usmerjenostjo v feromagnetiku je nelinearna – znana je kot krivulja magnetenja. Pri zmanjševanju zunanjega polja se skupinska usmerjenost zmanjšuje, vendar počasneje, kot je prej naraščala, torej ne po isti krivulji. Celoten cikel usmerjanja in razsmerjanja elementarnih magnetkov popisuje histerezna zanka feromagneta.

Posebne sestave feromagnetnega materiala lahko ohranijo skupinsko usmerjenost tudi po izklopu magnetnega polja. Imajo široko histerezno zanko in jih imenujemo trajni magneti. Sestav trajnih magnetov je zmes feromagnetikov z različnimi neferomagnetnimi dodatki. Pa tudi zmes neferomagnetikov v pravilni sestavi lahko izkazuje feromagnetne lastnosti.

Uporaba stalnih magnetov je izredno razširjena, srečujemo jih na različnih področjih, od pohištvene industrije, avtomobilske industrije, informacijskih tehnologij, do igrac, zabavne industrije itd.



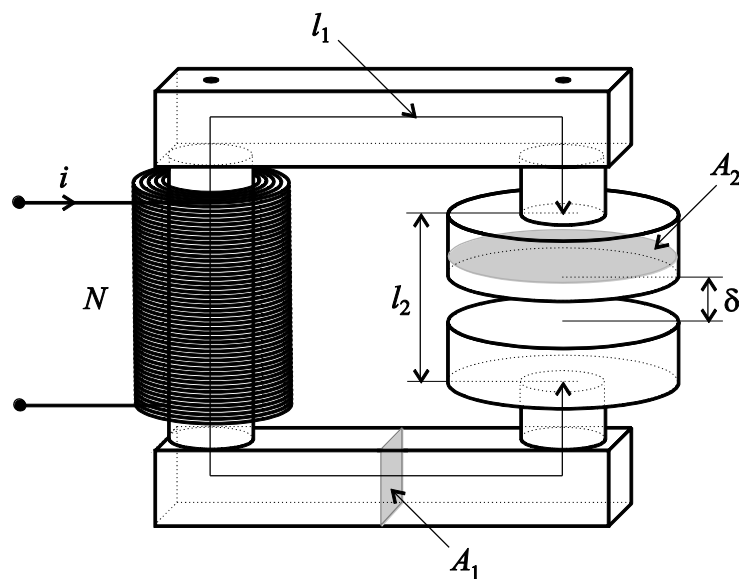
3. Viri

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, razdelki 4, 6, 8.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja V.44 in V.46 do V.48.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, poglavja §32-§35, §39.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 5.7 do 5.9, 5.14.4, 5.22 do 5.27.
- [5] Predavanja.
- [6] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 3.1, primeri m5 in m13.
- [7] <http://oe.fe.uni-lj.si/>, gradivo za laboratorijske vaje, OEII, vaja 2: Feromagnetik v magnetnem polju (magnetilna krivulja) ter Feromagnetik v magnetnem polju (histerezna zanka).
- [8] <http://oe.fe.uni-lj.si/>, gradivo za laboratorijske vaje, OEII, vaja 2 - 4: Uporaba osciloskopa za prikaz časovno spremenljivih veličin.

4. Priprava

Naloga

Feromagnetno jedro je sestavljeno iz dveh delov, ožjega, s srednjo dolžino $l_1 = 35,5$ cm in s ploščino preseka $A_1 = 3,14$ cm², ter šišega, dolžine $l_2 = 3$ cm in ploščine preseka $A_2 = 4 \cdot A_1$. Na širšem delu je zračna reža širine $\delta = 1,4$ mm. Okrog jedra je navitje z $N = 3000$ ovoji. Jedro je iz jeklene litine, čigar začetna krivulja magnetenja je podana na str. 29.



Feromagnetno jedro z zračno režo in navitjem.

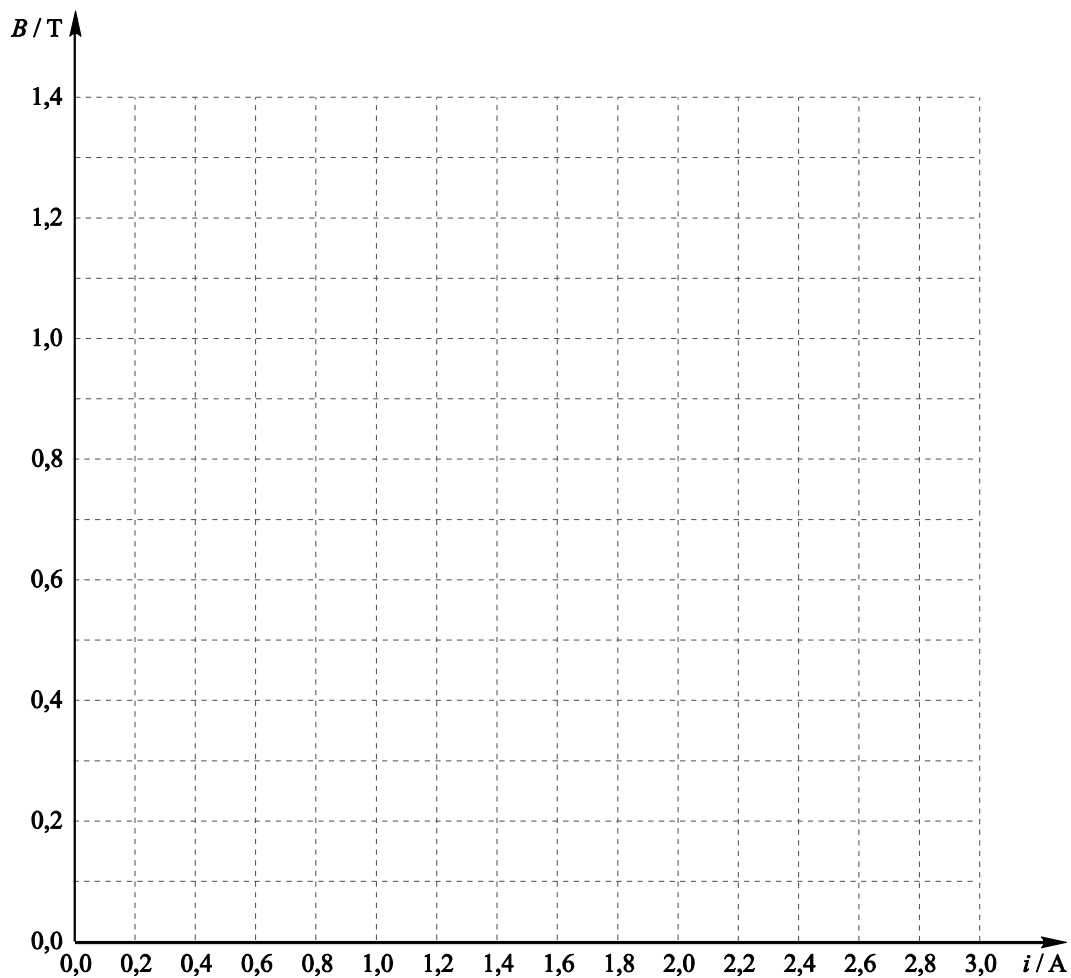


1. Izračunajte gostoto magnetnega pretoka B_0 v zračni reži in tok i v ovojih pri podanih gostotah pretoka B_{Fe} v ožjem delu jedra. Stresanje polja ob reži zanemarite.

B_{Fe} / T	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
B_0 / mT														
i / A														



2. Podane in izračunane vrednosti gostote magnetnega pretoka vrišite v spodnji diagram ter s pomočjo teh približno narišite tudi grafa odvisnosti gostot B_{Fe} in B_0 od toka i .



3. Iz diagrama odčitajte vrednosti gostot magnetnega pretoka v zračni reži in v ožjem delu jedra pri podanih vrednostih toka v ovojih.

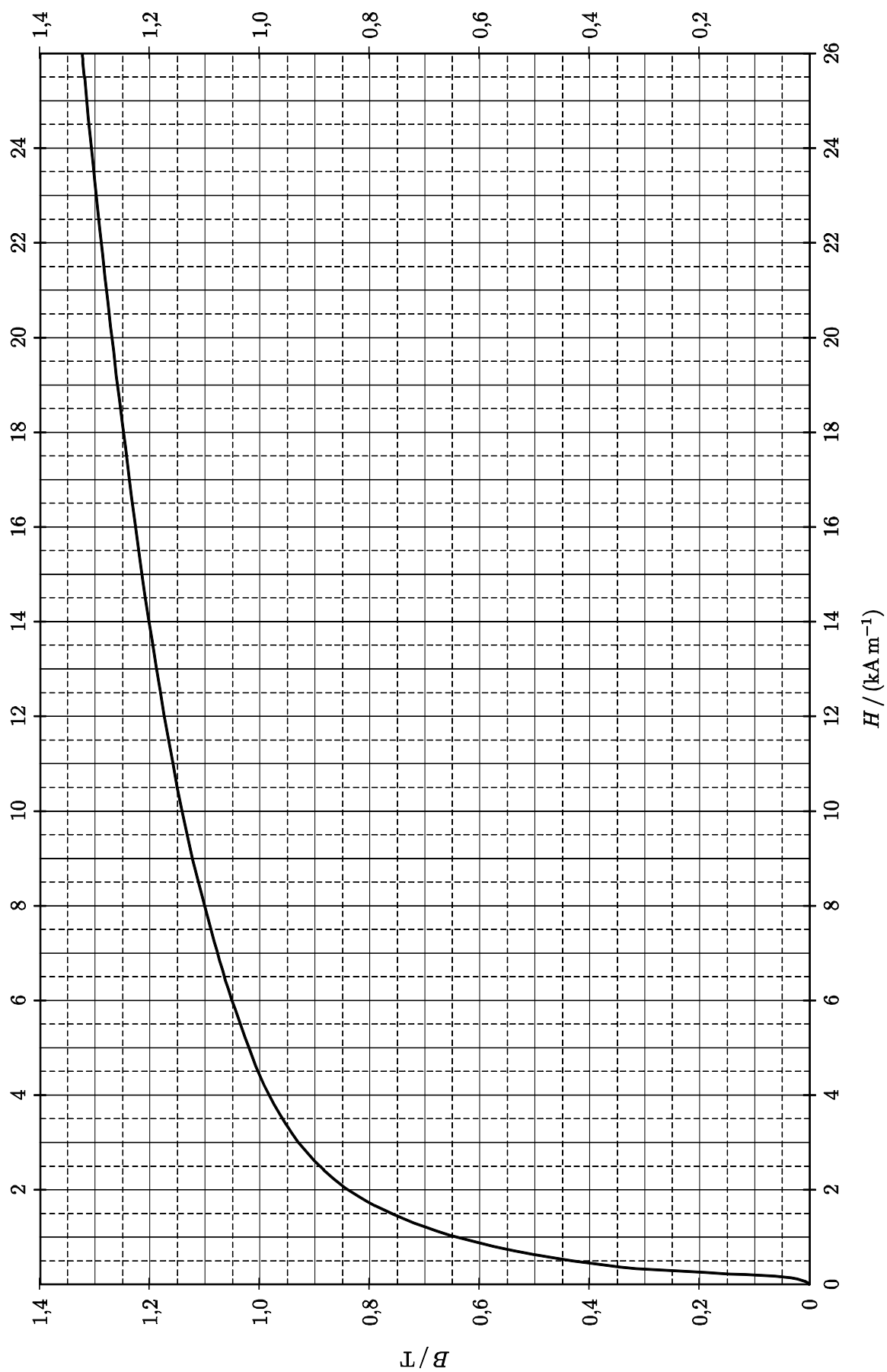
i / A	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1,0	1,75	2,5
B_0 / mT										
B_{Fe} / T										



4. Kolikšen je magnetni pretok ϕ v jedru, ko je tok v ovojih $i = 2,5 \text{ A}$?

$\phi = \dots\dots\dots \mu\text{Wb}$.

Začetna krivulja magnetenja



Izračun:



Izračun:



4.1. Vprašanja:

- ? 1. Naštejte pet feromagnetnih kemijskih elementov in navedite njihove Curiejeve temperature? (podrobnejše podatke o feromagnetnih elementih lahko poiščete na spletu, npr: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/curie.html>).

- ? 2. Kaj je začetna krivulja magnetenja (krivulja prvega magnetenja, deviška krivulja), kaj je histerezna zanka in kakšna je razlika med njima?

- ? 3. Navedite razliko med mehkomagnetnimi in trdomagnetnimi materiali?

- ? 4. Kaj so histerezne izgube in kako jih lahko določimo? (opcijsko)

5. Delo v laboratoriju

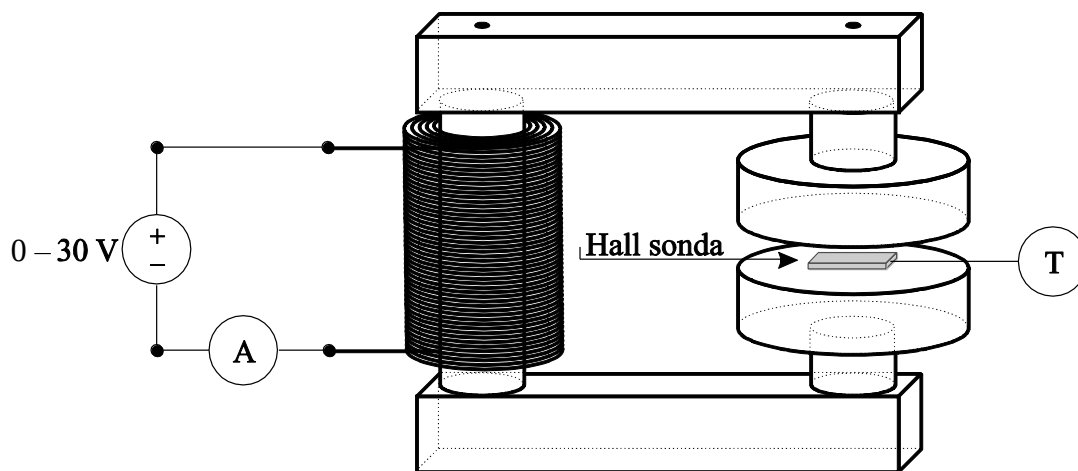
5.1. Naloge

1. izmeriti gostoto magnetnega pretoka v zračni reži jedra,
2. izmeriti krivuljo magnetenja jedra iz jeklene litine,
3. izmeriti remanentno gostoto in koercitivno poljsko jakost,
4. razmagnetiti feromagnetno jedro.

5.2. Merilni pribor

1. feromagnetno jedro z navitjem,
2. enosmerni vir,
3. univerzalni instrument (ampermeter za enosmerni tok), nastavljen na merilno območje 5 A (glej prilogo 3 na str. 84).
4. Teslameter s ploščato Hallovo sondo,
5. pomožni pribor,
6. osciloskop.

5.3. Merilna shema



5.4. Navodilo za delo v laboratoriju

Pri vaji merimo gostoto magnetnega pretoka v zračni reži feromagnetnega jedra v odvisnosti od električnega toka v navitju. S pomočjo izmerjenih vrednosti izračunamo in narišemo diagram gostote magnetnega pretoka v feromagnetnem jedru v odvisnosti od električnega toka pri povečevanju in zmanjševanju toka in pri negativnem toku v navitju.

1. Elemente vežite po merilni shemi. Na ampermetru izberite merilno območje 5 A (DC) (glejte prilogo 3. na str. 84), na Teslametru pa 2 T (DC).
2. Po dovoljenju demonstratorja vključite napajanje.
3. Na Teslameter priključite ploščato Hallovo sondo. V prilogi 1.4. na str. 79 preučite navodila za uporabo Teslametra. Pozor: pred uporabo Teslametra je slednjega potrebno kalibrirati in mu nastaviti ničlo.
4. Senzor sonde postavite čim bolj v os jedra.
5. Preverite, ali je jedro razmagneteno. Po potrebi razmagnetite jedro (glej tč. 7).
6. Izmerite absolutno vrednost gostote magnetnega pretoka B_0 v zračni reži pri tokovih, podanih v tabeli. Najprej *povečujte* tok od nič do maksimalne vrednosti (tabela a), potem *zmanjšujte* tok od maksimalne vrednosti do nič (tabela b), nakar *povečujte tok v obratni (negativni) smeri* toliko časa, da dobite gostoto magnetnega pretoka B_0 v zračni reži enako nič (tabela c). (Pri spreminjanju toka bodite pazljivi, da spremembe izvajate samo v eno smer – npr., ko tok povečujete, ga morate samo povečevati in ga ne smete niti malo zmanjšati.)

Zmanjšajte tok na nič.

a) povečevanje toka v navitju

i / A	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1,0	1,75	2,5
B_0 / mT										
B_{Fe} / mT										
$B_{Fe} = B_0 \cdot A_2 / (A_1 \cdot \varphi_{Fe}); \varphi_{Fe} = 1$										

b) zmanjševanje toka v navitju proti nič

i / A	2,5	1,75	1,0	0,75	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0
B_0 / mT										
B_{Fe} / mT										
$B_{Fe} = B_0 \cdot A_2 / (A_1 \cdot \varphi_{Fe}); \varphi_{Fe} = 1$										

c) počasno povečevanje toka v obratni (negativni) smeri

i / mA	0	5	10	15	20	25	30	35	40	
B_0 / mT										0
$B_{\text{Fe}} / \text{mT}$										0
$B_{\text{Fe}} = B_0 \cdot A_2 / (A_1 \cdot \varphi_{\text{Fe}}); \varphi_{\text{Fe}} = 1$										

7. Razmagnetite železno jedro. Kot enega izmed pristopov za razmagnetenje jedra lahko uporabimo usihajoč izmeničen tok. Ko znižujemo vrednost toka, se postopoma zmanjšuje tudi gostota magnetnega pretoka v jedru. Zaradi usihajočega alternirajočega toka pa je remanentna gostota magnetnega pretoka pri vsakem obhodu manjša. Ker se tok bliža ničli, je remanentna gostota ob koncu procesa zanemarljiva oz. praktično nič, zato lahko jedro tretiramo kot razmagneteno.

Železno jedro razmagnetite po naslednjem postopku:

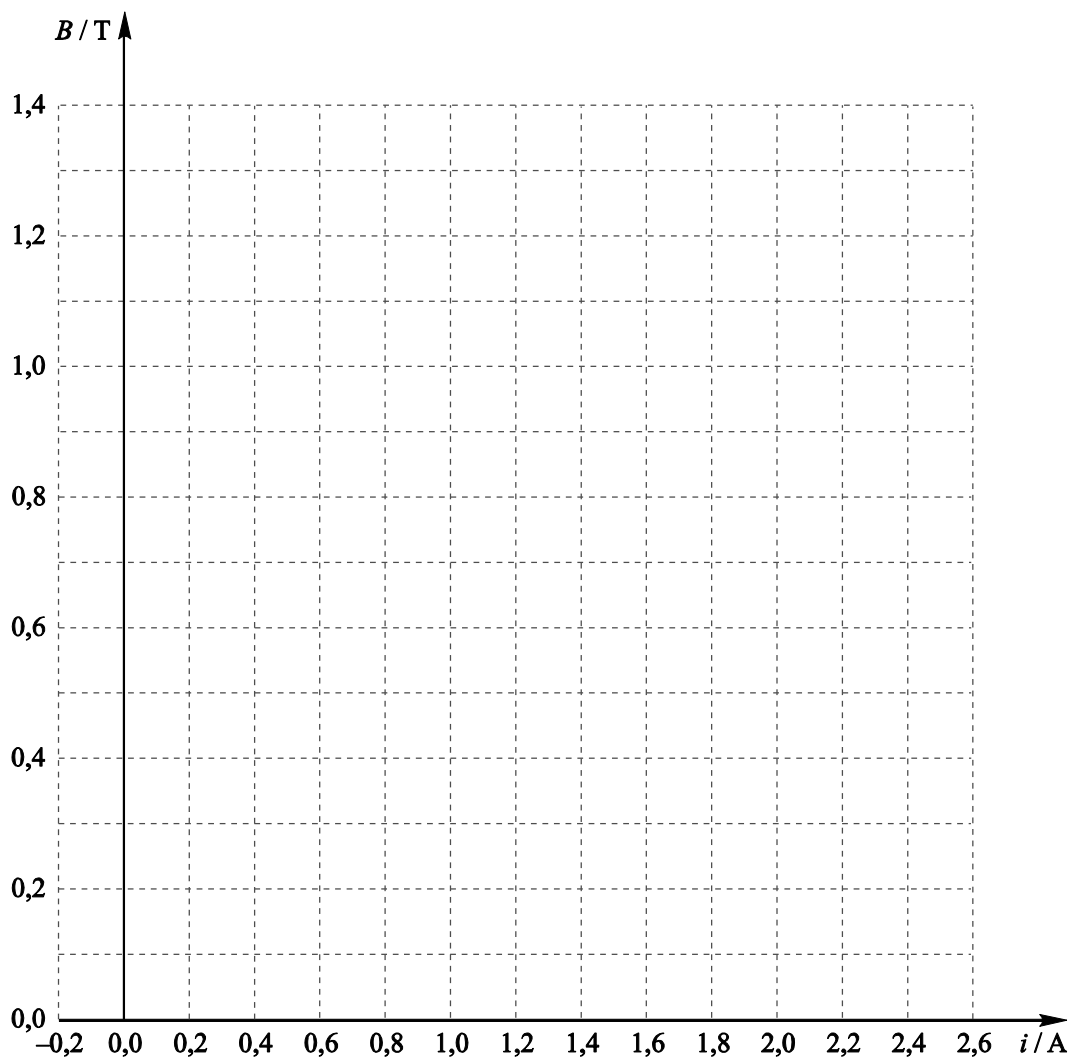
- Priključite navitje na sponke »sin(ωt)« faznega generatorja
- Frekvenco vira (faznega generatorja) nastavite na minimum (frekvenca bo takrat približno 0,5 Hz), amplitudo (U_1) nastavite na maksimum, izklopite enosmerni nivo (stikalo »DC nivo« prestavite v položaj »0«).
- (Zelo) počasi (cca. 10 sekund) zmanjšujte amplitudo toka na nič.
- Preverite, ali je gostota v reži jedra približno nič (npr. manj kot 5 mT), v nasprotnem primeru ponovite postopek razmagnetenja od točke b. naprej in še počasneje zmanjšujte amplitudo.



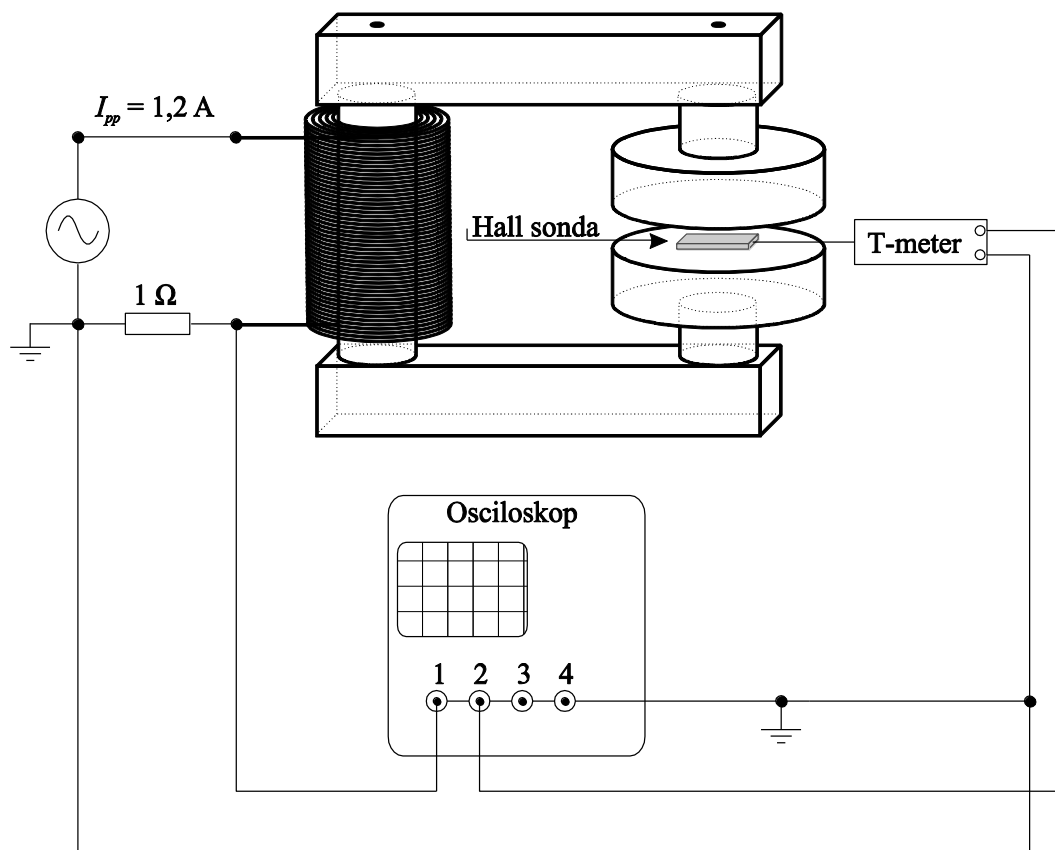
8. Izračunajte gostote magnetnega pretoka v ožjem delu jedru B_{Fe} in jih vpišite v tabele. Magnetni fluks v jedru je enak magnetnemu fluksu v zračni reži. $B_{\text{Fe}} \cdot A_1 \cdot \varphi_{\text{Fe}} = B_0 \cdot A_2$. (Nehomogenost magnetne gostote zaradi zračne reže smo pri tem zanemarili.) Iz te enačbe izrazimo $B_{\text{Fe}} = B_0 \cdot A_2 / (A_1 \cdot \varphi_{\text{Fe}})$. Ploščini presekov jedra A_1 in A_2 imata enaki vrednosti kot v nalogi iz pripav. φ_{Fe} je faktor polnjenja železnega jedra, ki je pri masivnem jedru našega eksperimenta enak $\varphi_{\text{Fe}} = 1$.



9. Iz podatkov v tabelah a, b in c narišite diagram gostote magnetnega pretoka v železnem jedru v odvisnosti od toka v navitju na jedru.



10. V drugem delu vaje tuljavo s feromagnetnim jedrom preko 1 ohmskega upora po spodnji shemi priklopimo na harmoničen vir nizkih frekvenc (sponke » $\sin(\omega t)$ « faznega generatorja). Pred priklopom vezja na vir nastavite amplitudo vira U_1 na 0 V. Vir naj bo med priklopom izključen.



11. Za merjenje in opazovanje signalov toka v tuljavi in gostote magnetnega pretoka v reži jedra uporabite osciloskop. Preučite prednjo ploščo osciloskopa in določite vlogo stikal, gumbov in priključnih sponk. Kratek opis prednje plošče osciloskopa in vloga stikal, gumbov in priključnih sponk je v prilogi 2: Osciloskop (str. 82).
12. Nastavite ničelna nivoja prvega in drugega kanala na sredino zaslona z gumboma za pozicijo CH1 in CH2.
13. Na prvi kanal osciloskopa priključite padec napetosti na upor, ki je sorazmeren toku v tuljavi.
14. Na drugi kanal osciloskopa priključite izhod kalibriranega Teslametra, ki s ploščato Hallovo sondo meri gostoto magnetnega pretoka v reži jedra.
15. Frekvenco generatorja naravnajte na minimum (frekvenca bo takrat približno 0,5 Hz).
16. Za prvi kanal preverite oz. nastavite enoto amper in razmerje 1V/A. (tipki »CH1« in »Probe menu«).
17. Izberite funkcijo »quick meas« ter za prvi in drugi kanal izberite merjenje vršnih (Peak-Peak) vrednosti.
18. Z ustrezno amplitudo generatorja (U_1) naravnajte vršno vrednost toka skozi vezje na $I_{pp} = 1,2$ A, izklopite enosmerni nivo (stikalo »DC nivo« prestavite v položaj »0«).
19. Nastavite primerne občutljivosti prvega in drugega kanala ter časovne baze (horizontalnega odmika), da bo zaslon optimalno izrabljen, torej da bosta signala izrisana čez cel zaslon. Za fino nastavitvev občutljivosti kanalov

izberite "Fine" (pri osciloskopu DSO 7014B) oziroma "Vernier" (pri osciloskopu DSO 6014A). Ta možnost je v meniju izbranega kanala.

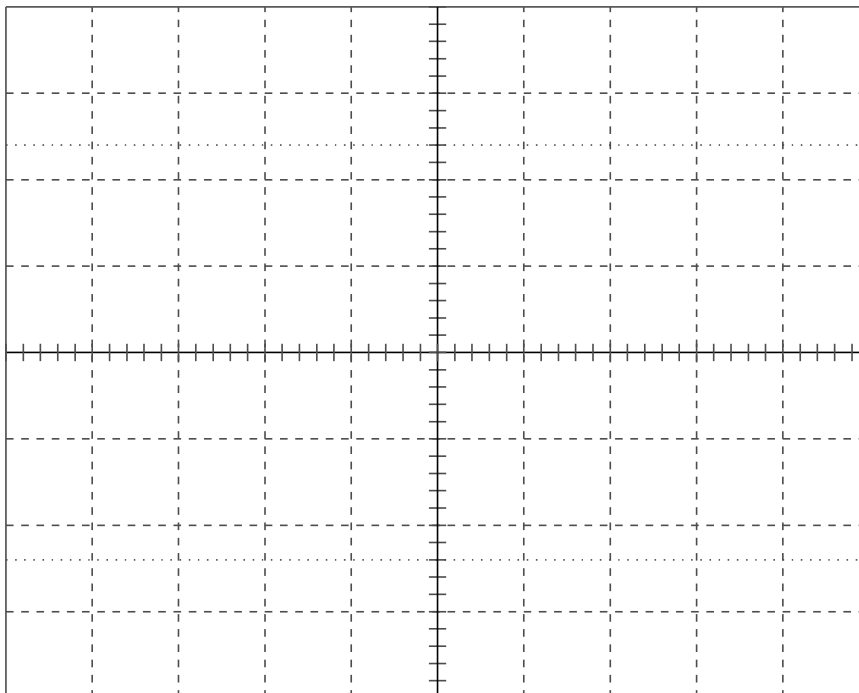
20. Oglejte si časovno odvisnost obeh signalov in zapišite opažanje:

21. Osciloskop prestavite v režim »X-Y«. Preklop med prikazom v časovnem prostoru »normal« in »X-Y« načinom prikaza je dostopen s tipko »Main/Delayed« (osciloskop DSO 6014A) oziroma s tipko »Menu/Zoom« (osciloskop DSO 7014A)).

22. Ker jedro vzbuja s harmoničnim tokom, na zaslonu opazimo histerezo odvisnost. Nastavite primerno občutljivost prvega in drugega kanala, da bo zaslon optimalno izrabljen, torej da bo histereza izrisana čez cel zaslon. V meniju »Display« s funkcijo »persist« zagotovite ohranjanje sledi poti, ki jo opisuje točka na zaslonu.



23. Prerišite histerezo zanko v spodnji diagram.



Vrišite ničli in zapišite koeficiente skale.

$k_x = \dots\dots\dots$ mA/razd

$k_y = \dots\dots\dots$ mT/razd

24. Ponovno razmagnetite jedro. Tokrat to lahko storite na drug način – z uporabo osciloskopa in gumba »DC nivo« na viru. Vezalna shema je enaka kot za izris histerezne zanke.

Amplitudo vira U_1 nastavite na 0 voltov, stikalo za nastavitvev DC nivoja preklopite v položaj 1. Z gumbom »DC nivo« pomaknite žarek (belo piko) osciloskopa na sredino zaslona - jedro je razmagneteno.

Odmik pike od sredine po x osi je sorazmeren toku skozi navitje, odmik po y osi pa gostoti magnetnega pretoka v zračni reži jedra.

5.5. Vprašanja:

- ? 1. Zakaj gostota magnetnega pretoka ni enaka preko celega prereza zračne reže?

- ? 2. Zakaj se razlikujeta gostota magnetnega pretoka v ožjem delu jedra in gostota magnetnega pretoka v zračni reži?

- ? 3. Kolikšen je fluks v jedru pri toku 2,5 A?

Pregledal:

5.6. Dodatna vprašanja:

1. Magnetno polje pri tej vaji merimo s Hallovim elementom. Raziščite in predstavite še druge načine za merjenje magnetnega polja.
2. Zamislite si in opišite praktičen primer uporabe feromagnetnega jedra z zračno režo.

Dodatni zapisi:



Vaja 3:

Vrtilno magnetno polje

1. Obravnavana tematika

Enofazni in večfazni sistemi, magnetno polje fazno premaknjenih harmoničnih tokov, vrtilno magnetno polje, inducirani vrtilni toki, vpliv faznega premika na vrtenje rotorja iz trajnega magneta ali iz neferomagnetnega električno prevodnega materiala, vpliv frekvence vzbujalnega toka na hitrost vrtenja rotorja.

2. Iz prakse

Sinus in cosinus sta harmonični funkciji, nastaneta pa tako, da vrteči kazalec projiciramo na med seboj pravokotni osi. Obrnimo zadevo: če sinusno in cosinusno funkcijo, ki sta na pravokotnih oseh, vektorsko seštejemo, dobimo vrteči kazalec konstantne dolžine. To je znano že od Starih Grkov.

Harmonična električna toka, med seboj fazno premaknjena za $\pi/2$, povzročata tudi harmonični magnetni polji, ki sta premaknjeni za $\pi/2$. Če ju spustimo skozi navitji, ki sta razmeščeni na pravokotni osi in vektorsko seštejemo njuni magnetni polji, dobimo konstantno vrteče se polje – vrtilno magnetno polje.

Ko je Nikola Tesla odkril vrtilno magnetno polje, je šel po obratni poti. Opazil je, da se železna krogla na sredini pokvarjenega transformatorja vrti. Začel je raziskovati zakaj? Odkril je to, kar smo opisali zgoraj: vrteči kazalec-magnetno polje je vleklo – vrtelo kroglo.

Vrtilno magnetno polje nepremičnega statorja (obodne tuljave s fazno premaknjenim harmoničnim električnim tokom) zmore vrteti premični rotor – osnova sodobnih električnih motorjev. S ščetkami se vsake pol obrata spreminja smer enosmernega toka rotorju, ki rotira v statorskem magnetnem polju tako, da polje rotorske zanke »lovi« smer statorskega polja. Lahko pa spreminjanje smeri toka v rotorski zanki dosežemo z uporabo izmeničnega toka. Kolektorske električne motorje so poznali pred Teslinim odkritjem, vrtilno magnetno polje pa je vneslo eleganco v pretvorbo električne energije v mehansko energijo. Vrtilno magnetno polje nastaja povsod okoli večfaznih električnih tokov, tudi v okolici transformatorjev in daljnovodov. Okoli večfaznih električnih vodov nastaja tudi vrtilno električno polje. Vrtilno električno polje ima manjšo uporabno vrednost zaradi manjše gostote električne energije, kot jo lahko dosežemo z magnetnim poljem.



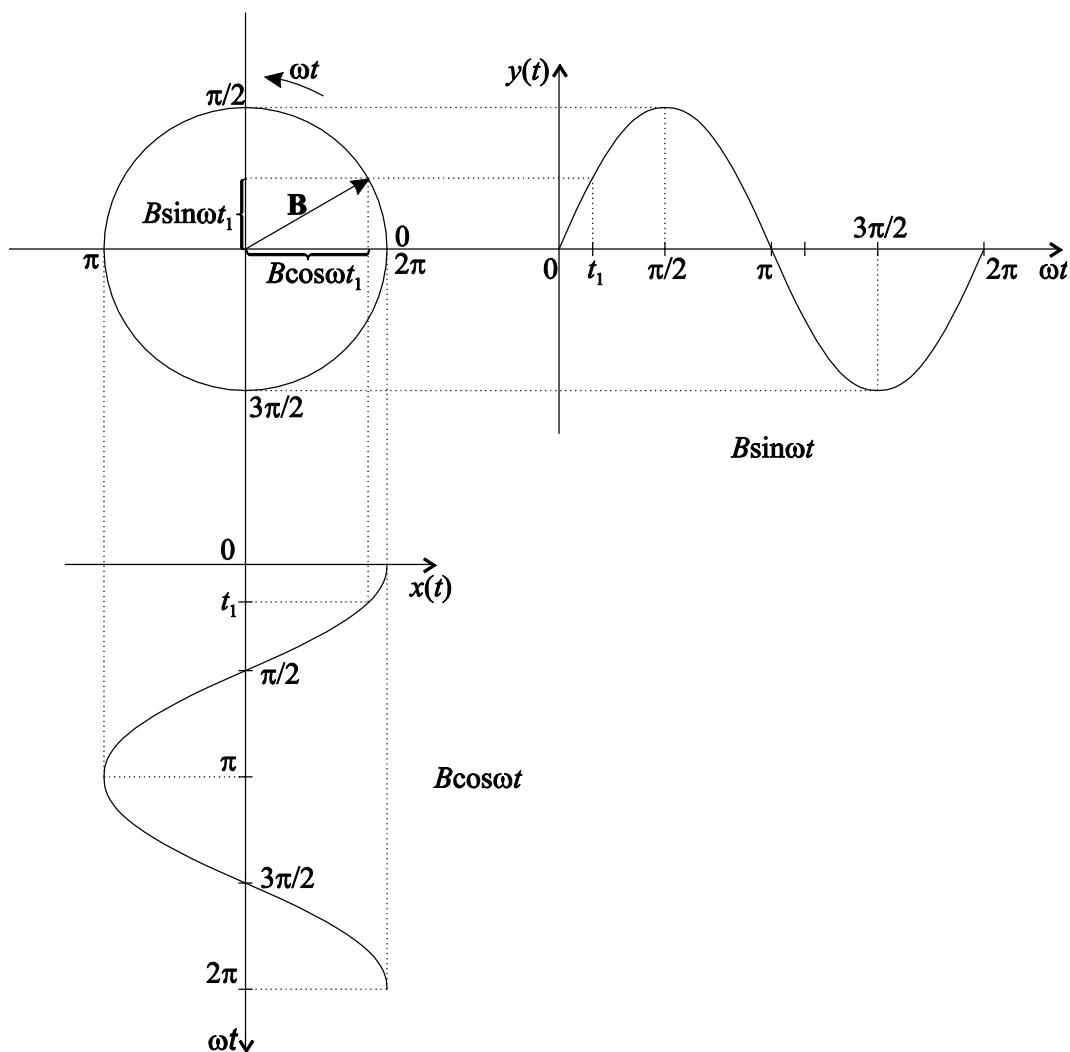
3. Viri

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, razdelek 20.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavje VII.68.

- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, poglavja 9, 10, 14, 15, 16, 17.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavje 8.15.1 do 8.15.8.
- [5] Predavanja.
- [6] Kokelj P.: Naloge iz osnov elektrotehnike II. Del: nal. 314, 370, 374 in 375.
- [7] <http://oe.fe.uni-lj.si/>, gradivo za laboratorijske vaje, OE II, vaja 3: Vrtilno magnetno polje.

4. Priprava

Princip vrtilnega magnetnega polja je naslednji: povzročitelj magnetnega polja vzdolž osi x je harmoničen tok $I_0 \cos(\omega t)$, povzročitelj magnetnega polja vzdolž osi y pa s četrtno periode ($\pi/2$) zakasnjjen tok $I_0 \sin(\omega t)$. Vektorska vsota teh dveh polj je polje (predstavimo ga s kazalcem) konstantne velikosti (dolžine), ki rotira s kotno hitrostjo ω v x - y ravnini (vrh kazalca pri tem opisuje krožnico).



Magnetni polji $B \cdot \cos(\omega t)$ (na osi x) in $B \cdot \sin(\omega t)$ (na osi y) sestavljata rotirajoči kazalec B konstantne dolžine.

Kadar harmonična signala nimata enakih amplitud ali pa nista fazno premaknjena natančno za četrtno periode ($\pi/2$), kazalec sicer rotira s hitrostjo ω , vrh kazalca pa pri tem opisuje elipso.

Vrtilno električno oz. magnetno polje torej v praksi nastane pri harmoničnih električnih in magnetnih poljih, ki jih povzročajo fazno premaknjene harmonične električne napetosti oziroma toki.

Da bi vzpostavili vrtilno magnetno vzbujanje, je potrebno tuljave krajevno (prostorsko) zamakniti. Navedeni, kot tudi v vaji merjeni primer predpostavlja, da sta tuljavi pravokotni. V praksi so pri gradnji vrtilnega magnetnega polja navitja (tuljave) razporejena po krožnici, ker se na ta način, pri vzbujanju s fazno zamaknjenimi harmoničnimi toki enakih amplitud in ustreznih zamikov, lahko doseže večje območje približno homogenega vrtilnega magnetnega polja, pri katerem konec kazalca magnetnega polja drsi po krožnici.

Vrtilno magnetno polje povzroča vrtenje stalnega magneta ali prevodnega rotorja, ki je vstavljen v to polje. Rotor s permanentnim magnetom se vrti sinhrono z magnetnim poljem, ker nanj deluje navor, ki skuša permanentni magnet obrniti v smer (vrtečega se) polja. Če želimo, da je rotacija vidna, se mora rotor vrteti dovolj počasi, z nizkim številom vrtljajev, torej mora biti frekvenca manjša od 5 Hz. Rotor iz prevodnega materiala se vrti asinhrono (počasneje od kazalca vrtilnega magnetnega polja), frekvenca polja je pri tem lahko tudi višja (od 10Hz). V prevodnem materialu se namreč zaradi spreminjajočega se magnetnega polja inducirajo vrtnični toki, ki z zunanjim – vrtilnim magnetnim poljem povzročajo vrtenje rotorja.

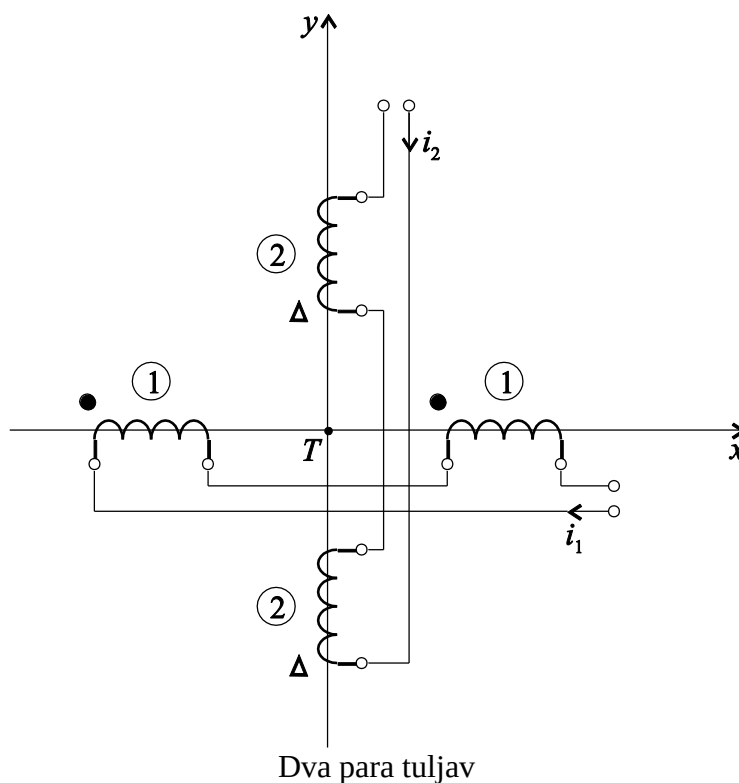
Če prostorskega razmika ni (npr. vzbujan je samo en par tuljav) magnetno polje niha samo v smeri ene osi.

Oblike vzbujalnih tokov lahko opazujemo na zaslonu osciloskopa. Če osciloskop preklapimo v režim XY (en signal povzroča odklon X drugi pa odklon Y), za četrto periode zamaknjena toka ($\varphi = \pi/2$) enakih amplitud na zaslonu opisujeta krožnico. Če imata vzbujalna toka fazni kot različen od $\pi/2$ in/ali različni amplitudi, na zaslonu opišeta elipso. Če izklopimo en signal, povzroča drugi le odklon od nič na eno in drugo stran vzdolž ustrezne osi.

Z dodatno opremo bomo na osciloskopu opazovali tudi seštevke dveh polj (vrtilno magnetno polje) tako, da na osciloskopu vrtilno magnetno polje ponazorimo z vrtečo daljico okoli rotacijske osi.

Naloga

Vezje, sestavljeno iz štirih enakih tuljav, ima po dve tuljavi vezani zaporedno. Razmeščene so v krake križa, tako da sta osi parov tuljav med seboj pravokotni. Para tuljav sta vzbujana s harmoničnima tokoma enakih amplitud, ki sta fazno premaknjena za $\pi/2$. V prvih dveh tuljavah, ki vzbujata magnetno polje v smeri osi x , je tok $i_1(t) = I_m \cos(\omega t + \pi/6)$, v drugih dveh, ki vzbujata magnetno polje v smeri osi y , pa $i_2(t) = I_m \cos(\omega t + 2\pi/3)$, kjer sta amplituda $I_m = 2$ A in krožna frekvenca $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 5$ Hz. V točki T , ki je presečišče osi parov tuljav, je x oziroma y komponenta vektorja gostote magnetnega pretoka sorazmerna toku i_1 oziroma toku i_2 : $B_x(T,t) = k_B i_1(t)$ in $B_y(T,t) = k_B i_2(t)$, kjer je sorazmernostna konstanta $k_B = 5$ mT/A.

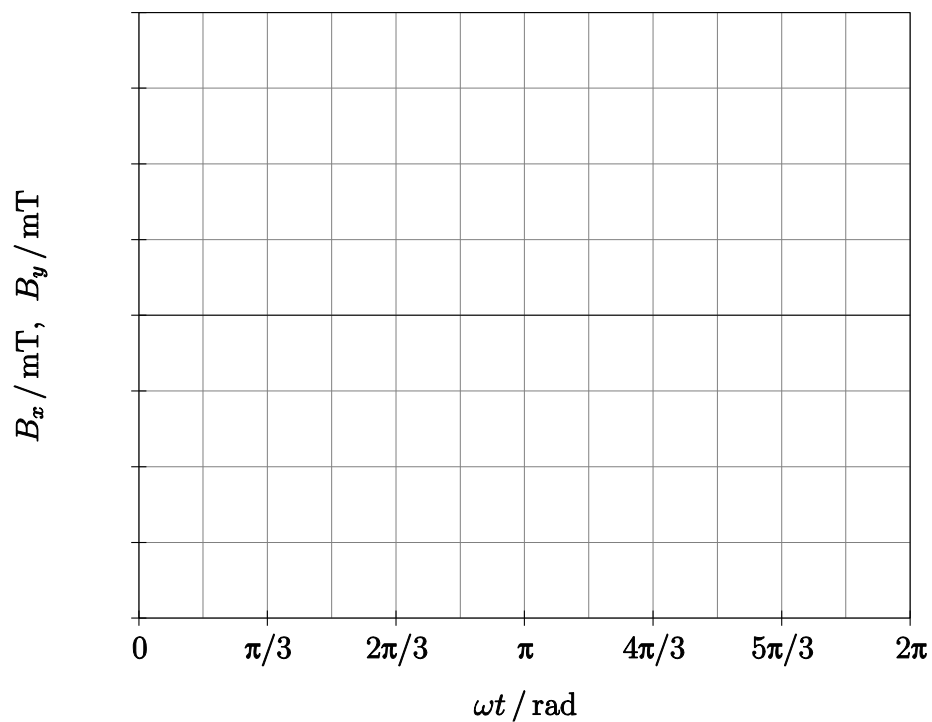


1. Določite vrednosti komponent gostote pretoka B_x in B_y v točki T v tistih trenutkih t , katerim produkti s krožno frekvenco so podani v tabeli.

$\omega t / \text{rad}$	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$5\pi/6$	π	$4\pi/3$	$3\pi/2$	$11\pi/6$	2π
B_x / mT										
B_y / mT										



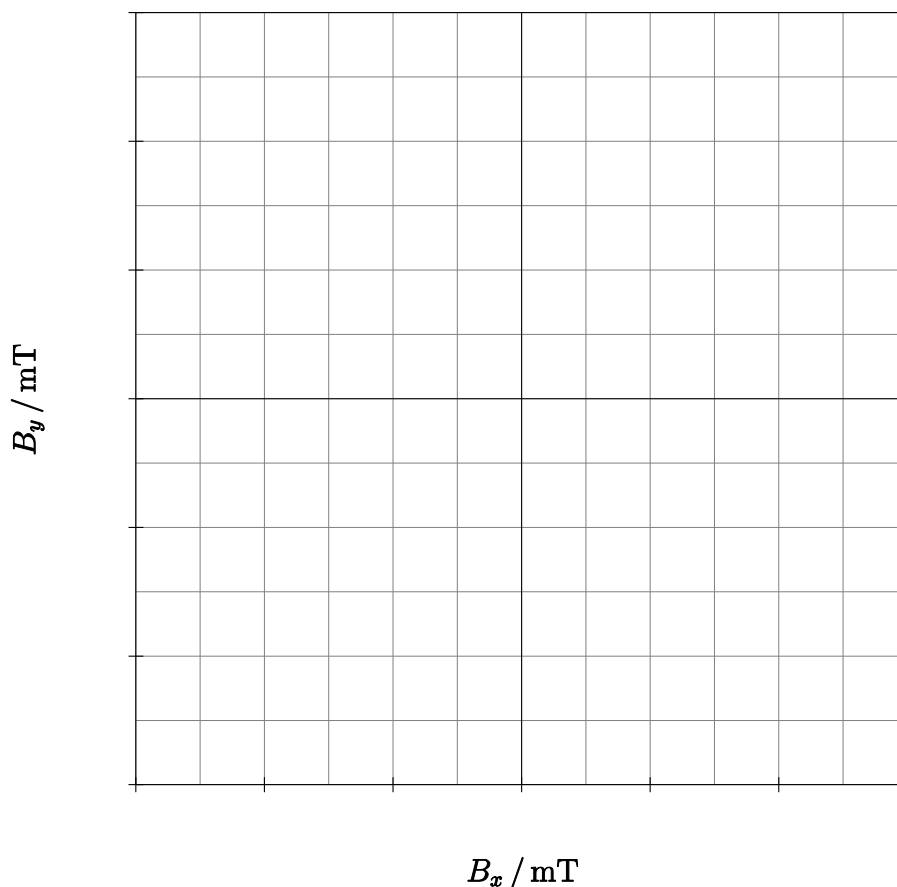
2. V spodnji diagram narišite vrednosti iz zgornje tabele. Z različnima barvama označite vrednosti za komponenti B_x in B_y . Sami izberite ustrezno merilo na vertikalni osi.



3. V zgornji diagram skicirajte časovna poteka za komponenti gostote pretoka B_x in B_y v točki T .



4. V spodnji diagram narišite vektorje gostote magnetnega pretoka $\mathbf{B}$, katerim vrednosti komponent so podane v tabeli iz prve točke. Pri vsakem vektorju napišite, pri kolikšnem produktu ωt je določen. Sami izberite ustrezna merila na horizontalni in vertikalni osi.



5. V zgornji diagram skicirajte tirnico, ki jo opisuje konica vektorja gostote magnetnega pretoka $\mathbf{B}$ v točki T , in označite smer vrtenja.

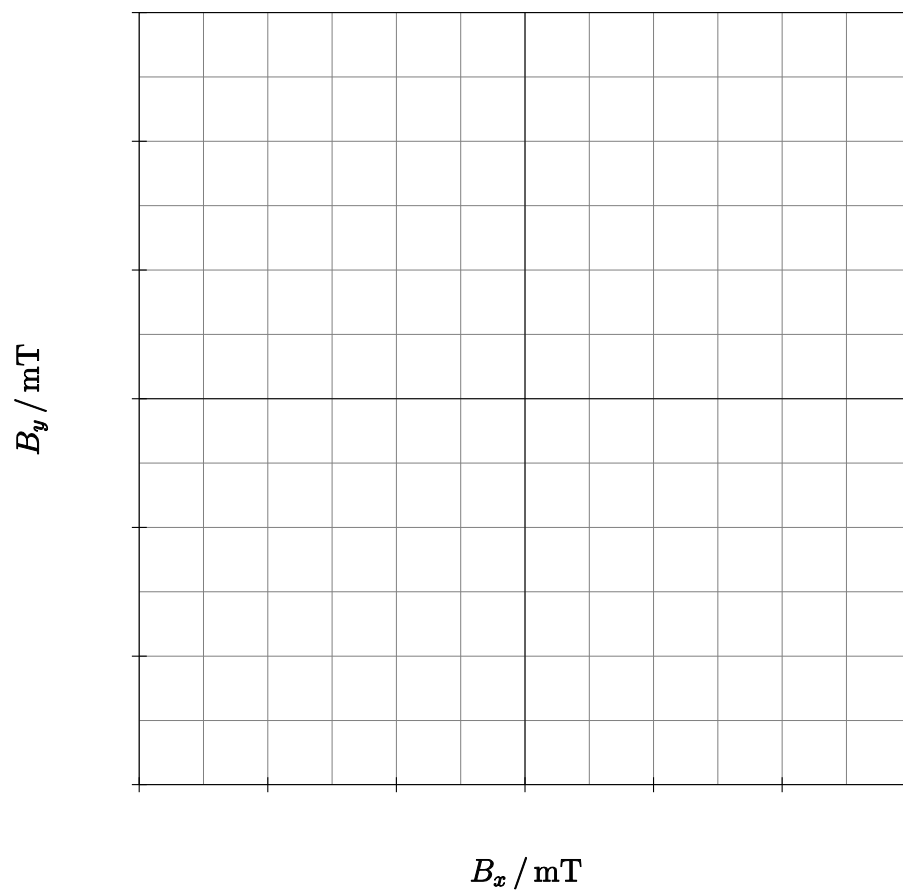


6. Majhen trajni magnetek postavimo med tuljave tako, da ima središče v točki T . Magnetek v vrtilnem polju rotira tako, da njegov dipolski moment absolutne vrednosti $m = 80 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ leži vseskozi v x - y ravnini. Za kolikšen kot α ta moment zaostaja za vrtilnim poljem, če navor magnetnih sil premaguje navor sile trenja $M_{\text{tr.}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$?

$\alpha = \dots\dots\dots$



7. V spodnji diagram skicirajte tirnico, ki bi jo opisovala konica vektorja gostote magnetnega pretoka $\mathbf{B}$ v točki T , če bi toka v obeh parih tuljav bila sofazna: $i_1(t) = 1,6 \text{ A} \cdot \sin(\omega t + \pi/3)$ ter $i_2(t) = 2 \text{ A} \cdot \sin(\omega t + \pi/3)$. Sami izberite ustrezna merila.



Izračun:



Izračun:

4.1. Vprašanja:

- ? 1. Zakaj in kako v vrtilnem magnetnem polju rotira trajni magnet?

- ? 2. Kako in zakaj se v vrtilnem magnetnem polju giblje rotor iz aluminija?

5. Delo v laboratoriju

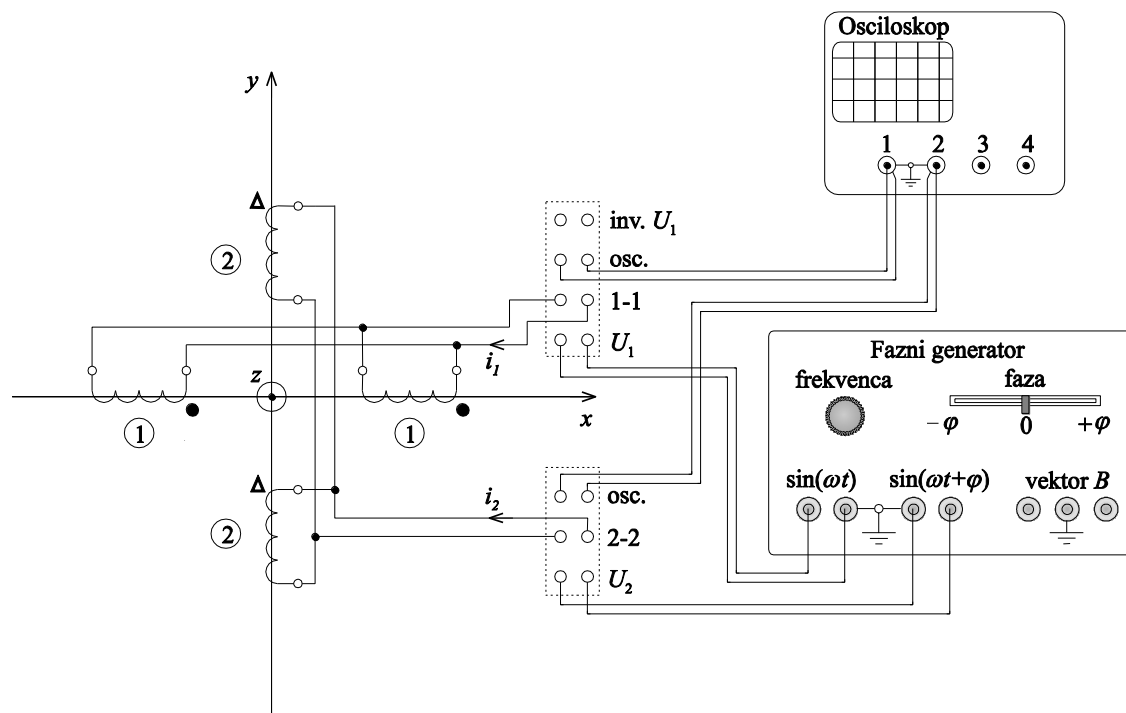
5.1. Naloge

1. izmeriti magnetno polje fazno premaknjenih harmoničnih tokov,
2. določiti vpliv faznega premika vzbujalnih tokov na smer vrtenja trajnega magneta,
3. izmeriti vpliv faznega premika vzbujalnih tokov na vrtenje rotorja iz prevodnega materiala,
4. izmeriti vpliv frekvence vzbujalnega toka na hitrost vrtenja rotorja,
5. prikaz fazno premaknjenih tokov na zaslonu osciloskopa.

5.2. Merilni pribor

1. fazni generator,
2. pravokotna para tuljav,
3. Teslameter s sondami in plastičnim nosilcem
4. osciloskop,
5. pomožni pribor.

5.3. Merilna shema



5.4. Navodilo za delo v laboratoriju

Vezje, sestavljeno iz štirih enakih tuljav, ima po dve tuljavi vezani vzporedno. Razmeščene so v krake križa, tako da so osi parov tuljav med seboj pravokotne. V sredini med tuljavami je na trnu rotor s permanentnim magnetom ali rotor iz električno prevodnega materiala, ki se vrti v eno ali v drugo smer, odvisno od faznega premika med vzbujalnima tokoma.

Na osciloskopu opazujemo fazno premaknjena signala in njun medsebojni premik, ki ga nastavimo z drsnim potenciometrom »Faza« na faznem generatorju. V režimu XY lahko opazujemo na osciloskopu krožnico ali elipso. Pri izklopljenem enem izmed signalov opazujemo nihanje točke vzdolž ene izmed osi – osi x ali osi y.

Pri faznem premiku manjšem od $\pi/2$ se rotor vrti v eno smer. Pri faznem premiku nič, se rotor ustavi. Pri nadaljnjem spreminjanju faze v negativno smer se začne rotor vrteti v obratni smeri. Rotacijo magnetnega polja prikažemo tudi z vrtečo daljico okoli rotacijske osi.

S Teslametrom merimo gostoto magnetnega polja v več točkah v prostoru med tuljavami.

1. Vežite elemente po sliki. Priključni sponki U_1 prvega para tuljav povežite na sponki »sin(ωt)« faznega generatorja, priključni sponki U_2 drugega para pa na sponki »sin($\omega t + \phi$)«. Za opazovanje toka skozi en oz. drug par tuljav z osciloskopom, vežite sponke »osc.« parov tuljav na kanal 1 oz. 2 osciloskopa. Shema vezja je v prilogi na strani 85.



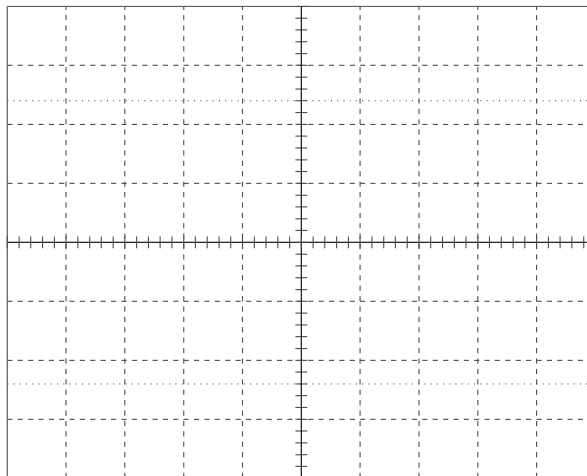
2. Po dovoljenju demonstratorja vklopite napajanje. Opomba: *Oscilator v faznem generatorju doseže stabilno stanje po nekaj periodah, kar pri zelo nizkih frekvencah (en ali dva Hz) lahko traja tudi nekaj sekund. Strpno pri nastavljanju.*
3. Izklopite enosmerni nivo (stikalo »DC nivo« prestavite v položaj »0«).
4. Na trn med tuljave postavite rotor s stalnim magnetom. Frekvenco vzbujalnega toka nastavite med 2 Hz in 5 Hz. Naravnajte enaki amplitudi vzbujalnih tokov v obeh parih tuljav. Fazni premik med vzbujalnima tokoma naravnajte na $\pi/2$ (drsnik »Faza« naj bo v položaju $+90^\circ$). Opazujte vrtenje rotorja.
5. Z drsnikom »Faza« na faznem generatorju spreminjajte fazni premik med vzbujalnima tokoma. Hkrati opazujte spremembo faze na zaslonu in vrtenje rotorja.

Kaj se dogaja z rotorjem pri faznem premiku 0?

Kaj se zgodi z rotorjem, ko naravnate fazo toka, ki je prehiteval, da zaostaja?

6. Preklopite osciloskop v režim dela XY. Preklop med prikazom v časovnem prostoru »normal« in »X-Y« načinom prikaza je dostopen s tipko »Main/Delayed« (osciloskop DSO 6014A) oziroma s tipko »Menu/Zoom« (osciloskop DSO 7014A)).
7. Naravnajte fazni premik med vzbujalnima tokoma na $\varphi = \pi/2$. Opazujte krivuljo, ki jo točka opisuje na zaslonu; vrišite krivuljo v diagram in označite smer gibanja točke po krivulji.

Zapišite konstanti skal.

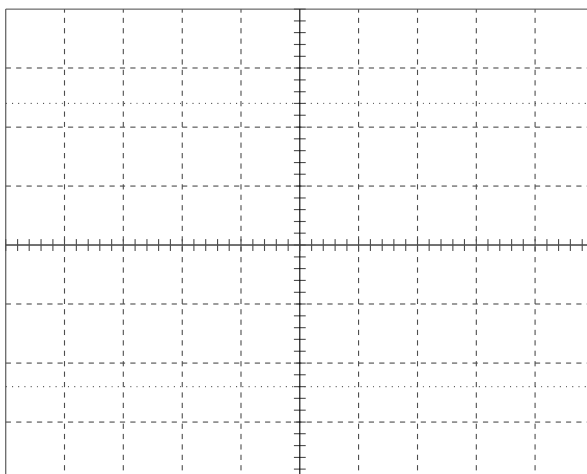


Režim XY, enaki amplitudi, $\varphi = \pi/2$

$k_x = \dots\dots\dots$ mV/razd.

$k_y = \dots\dots\dots$ mV/razd.

8. Z drsnikom »Faza« na faznem generatorju spreminjajte fazni premik med vzbujalnima tokoma. Hkrati opazujte spremembo faze na zaslonu in vrtenje rotorja.
9. Naravnajte fazni premik med vzbujalnima tokoma na $\varphi = 0$. Opazujte krivuljo, ki jo točka opisuje na zaslonu; vrišite krivuljo v diagram in označite smer gibanja točke po njej.



Režim XY, enaki amplitudi, $\varphi = 0$

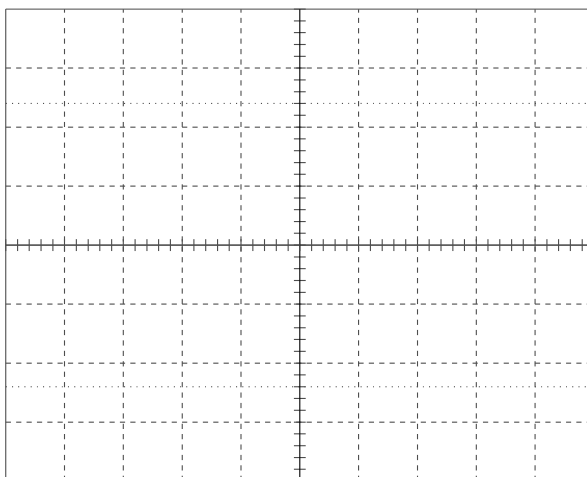
$k_x = \dots\dots\dots$ mV/razd.

$k_y = \dots\dots\dots$ mV/razd.

10. Izključite signal »sin(ωt)«, tako da gumb U_1 naravnate na nič. Hkrati opazujte sliko na zaslonu in obnašanje rotorja. Sliko vrišite v diagram, opišite obnašanje rotorja.



11. Naravnajte signal »sin(ωt)« na prvotno vrednost in izključite signal »sin($\omega t + \varphi$)«, tako da gumb U_2 naravnate na nič. Hkrati opazujte sliko na zaslonu in obnašanje rotorja. Sliko vrišite v diagram (z drugo barvo), opišite obnašanje rotorja.



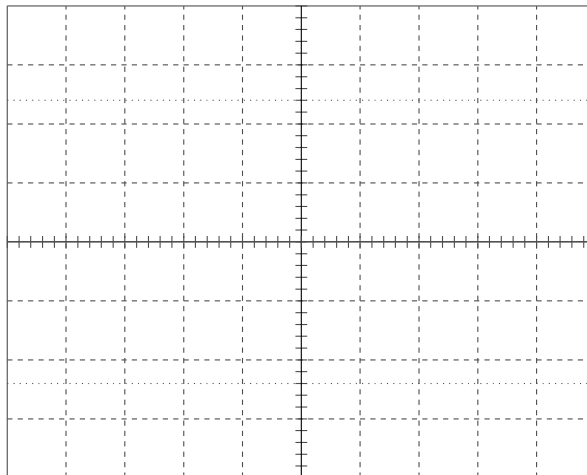
a) Režim XY, $U_1 = 0$

b) Režim XY, $U_2 = 0$

$k_x = \dots\dots\dots$ mV/razd.

$k_y = \dots\dots\dots$ mV/razd.

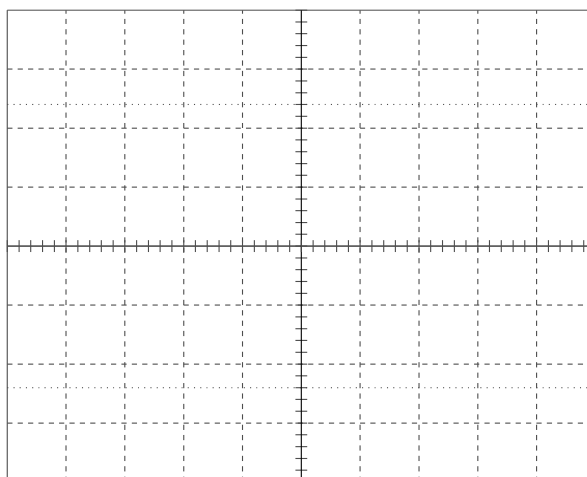
12. Sonde osciloskopa priključite na sponke »Vektor B« na faznem generatorju (režim XY, enaki amplitudi, fazni premik med vzbujačnima tokoma $\pi/2$). Opazujte sliko na zaslonu ter v diagram narišite izbrani trenutni položaj. Dodajte daljici puščico in označite smer vrtenja. Spreminjajte fazni premik med signaloma in narišite sliko na zaslonu pri fazni razliki med signaloma 0. Opazujte obnašanje rotorja.



a) Izbrani položaj vektorja, $\varphi = \pi/2$

b) Tirnica vektorja, $\varphi = 0$

13. Zopet naravnajte fazni premik med vzbujačnima tokoma na $\pi/2$. Spreminjajte amplitudo enega ali drugega vzbujačnega toka. Naravnajte amplitudi toka tuljav 1-1 na polovico amplitude toka tuljav 2-2. Opazujte sliko na zaslonu in narišite en položaj daljice, ko je ta najdaljša in en njen položaj, ko je najkrajša. Dodajte jim puščico. Črtkano narišite tirnico vrha daljice pri eni periodi.



a) Izbrani položaj vektorja, $I_1 = \frac{1}{2} I_2$, $\varphi = \pi/2$

b) Tirnica vektorja $\varphi = \pi/2$

14. Osciloskop priključimo kot v točki 1 (puše »osc.« vsakega para tuljav na svoj kanal). Na trn med tuljave dajte rotor iz aluminija. Frekvenco vzbujalnega toka naravnajte med 20 Hz in 50 Hz (rotor naj se vrti s hitrostjo, ki ji lahko sledite). Naravnajte enaki, čim večji amplitudi obeh vzbujalnih tokov. Fazni premik med vzbujalnima tokoma naravnajte na $\pi/2$.
15. Z drsnikom »Faza« na faznem generatorju spreminjajte fazni premik med vzbujalnima tokoma. Hkrati opazujte spremembo faze na zaslonu in vrtenje rotorja.

Kaj se dogaja z rotorjem pri faznem premiku 0?

Kaj se zgodi z rotorjem, ko naravnate fazo toka, ki je prehiteval, da zaostaja?

16. Nastavite enaki amplitudi vzbujalnih tokov in fazni premik na $\pi/2$. Počasi nižajte frekvenco, da se rotor ustavi. Izmerite frekvenco.

$f_{ustavitve} = \dots\dots\dots$ Hz.

Počasi višajte frekvenco od nič navzgor, da se rotor začne ponovno vrteti. Izmerite frekvenco.

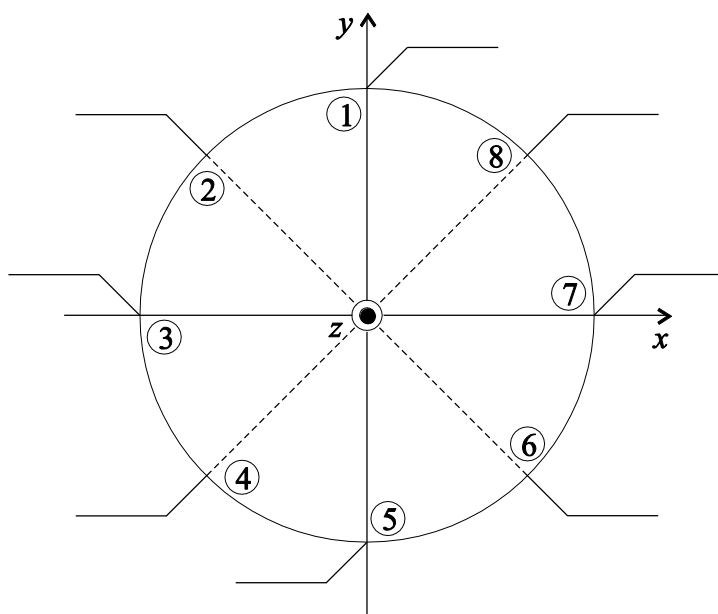
$f_{zagona} = \dots\dots\dots$ Hz.

17. Vključite Teslameter, kalibrirajte ga, merilno območje nastavite na 200 mT in naravnajte na ničlo po navodilu v prilogi 1.4. (str. 79). Na izhod Teslametra priključite kanal 3 osciloskopa. Kanal 1 priključite na sponki »osc.« prvega, kanal 2 pa drugega para tuljav. Naravnajte enaki amplitudi vzbujalnih tokov (gumba U_1 in U_2 na faznem generatorju nastavite na čim večjo vrednost), fazni premik $\pi/2$ in frekvenco med 10 in 20 Hz.
18. Ploščato sondo vstavite v zarezo ob obodu priložene plastične cevi. Sondo naravnajte tako, da bo njena rdeče obarvana stran obrnjena stran od sredine cevi. Kabel sonde utrdite v utor, da sonda miruje pri obračanju cevi. Napetost iz Teslametra merite na kanalu 3 osciloskopa. Po potrebi naravnajte proženje časovne baze osciloskopa na kanal 1.

19. Postavite cev s sondo navpično na trn v sredino med tuljavami. Obrnite jo tako, da bo pozitivna (rdeče obarvana) stran sonde v smeri proti zgornji tuljavi para 2-2. Takrat je sonda v položaju 1 na sliki.

Postopoma zavrtite cev okoli navpične osi v matematično pozitivnem smislu tako, da boste izmerili gostoto magnetnega pretoka v vseh označenih položajih od 1 do 8 na sliki. Z osciloskopom izmerjene efektivne vrednosti napetosti preračunajte v gostoto magnetnega pretoka ($B_{\text{ef}} = U_{\text{ef}} \cdot k$) in jih vpišite v spodnjo sliko. Konstante Teslametra so glede na merilno območje podane v tabeli.

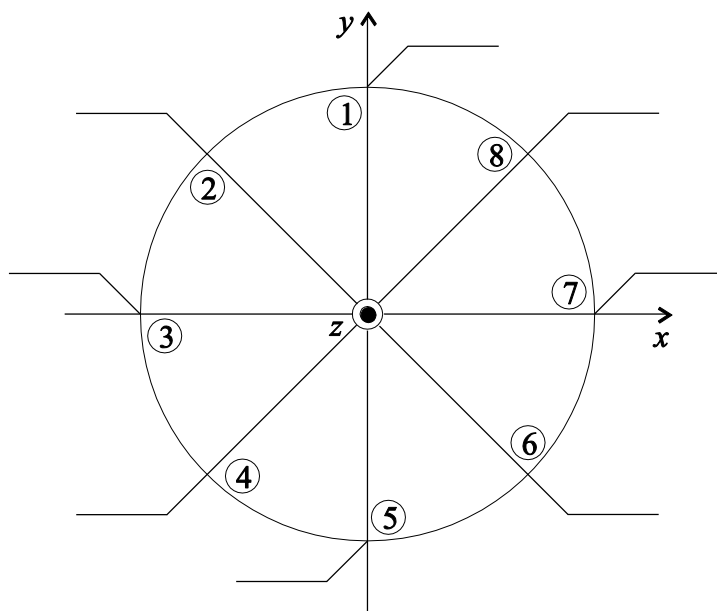
Merilno območje	2 mT	20 mT	200 mT	2 T
k (mT/V)	1	10	100	1000



Gostota magnetnega pretoka v prostoru med tuljavami – na obodu

Iz izmerjenih vrednosti ugotovite, ali se amplituda gostote magnetnega polja spreminja z vrtenjem sonde. Če se, v katerem položaju (pri katerem kotu) je amplituda največja in v katerem je najmanjša?

20. Postavite sondo v zarezo v središču cevi, merilno območje Teslametra preklopite na 20 mT, preverite ničlo in ponovite meritev v položajih od 1 do 8. Izmerjene efektivne vrednosti gostote magnetnega pretoka vpišite v spodnjo sliko. Opazujte fazni premik med signalom iz Teslametra in vzbujačnim tokom v paru 1-1 ter paru 2-2 tuljav.



Gostota magnetnega pretoka v prostoru med tuljavami – v središču

5.5. Vprašanja:

- ? 1. Zakaj je potrebna višja frekvenca vzbujačnih tokov za enako vrtilno hitrost pri rotorju iz aluminija kot pri rotorju s permanentnim magnetom?

Pregledal:

5.6. Dodatna vprašanja:

1. Skicirajte preprost kolektorski motor in opišite njegovo delovanje.
2. Opišite nekaj primerov koristne uporabe vrtilnih tokov.

Dodatni zapisi:



Vaja 4:

Inducirano električno polje

1. Obravnavana tematika

Osnovne zakonitosti inducirane električnega polja in inducirane napetosti, določanje oblike inducirane napetosti v odvisnosti od oblike magnetnega pretoka – povzročitelja, merjenje inducirane napetosti na medsebojni induktivnosti, določanje medsebojne induktivnosti na podlagi izmerjene inducirane napetosti.

2. Iz prakse

Dolgo je trajalo, da so ugotovili, da pravzaprav električni tok – gibano električno polje – povzroča magnetno polje. Še dodaten čas pa je pretekel do odkritja, da tudi spremenljajoče magnetno polje povzroča električno polje (inducirano električno polje). Do tedaj so kot izvor električne energije uporabljali zgolj kemične vire – baterije. Ti viri so bili omejeni po kapaciteti. Prav tako je bil omejen transport energije.

Z odkritjem inducirane električnega polja kot posledice spremenljivega magnetnega polja je bil tako zaključen krog: električno polje $\leftrightarrow$ magnetno polje in v obratno smer. Odkrita je bila možnost pretvorbe mehanske (takrat predvsem vodne) energije v električno energijo – v električnih generatorjih in pretvorbe električne energije nazaj v mehansko – v električnih motorjih. Na drugi strani je inducirano električno polje omogočilo pretvorbo nizke napetosti v visoko napetost in nazaj v nizko napetost v električnih transformatorjih. S tem se je zelo povečala količina pridobljene električne energije ter povečal doseg njenega prenosa. Dana je bila osnovna možnost za elektrifikacijo – široko uporabo električne energije pri delu in življenju nasplo.

Naštejmo nekaj primerov uporabe električnega polja, ki se zgradi na podlagi elektromagnetne indukcije: vžigalna iskra za plin na štedilniku in vžigalna iskra v bencinskih motorjih sta posledici velikega električnega polja, ki ga inducira spremenjanje magnetnega polja v vžigalni tuljavi, uničujoča iskra v računalniku, ki se inducira zaradi udara strele v oddaljen hrib, transformacija električne energije v megavatnem transformatorju elektroenergetskega omrežja, prenos signalov preko visokofrekvenčnega transformatorja, brezžična povezava med računalniki, mobilna telefonska omrežja itd. Vsi naštet primeri temeljijo na enaki osnovi – induciranjem električnem polju, kot posledici spremenljivega magnetnega polja.



3. Viri

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, razdelka 9, 10.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja VI.52 do VI.54.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 3, poglavji §37, §38.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 6.1 do 6.7.
- [5] Predavanja.
- [6] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 3.1, primeri m24, m26 in m28.
- [7] <http://oe.fe.uni-lj.si/>, gradivo za laboratorijske vaje, OE II, vaja 4: Indukcija.

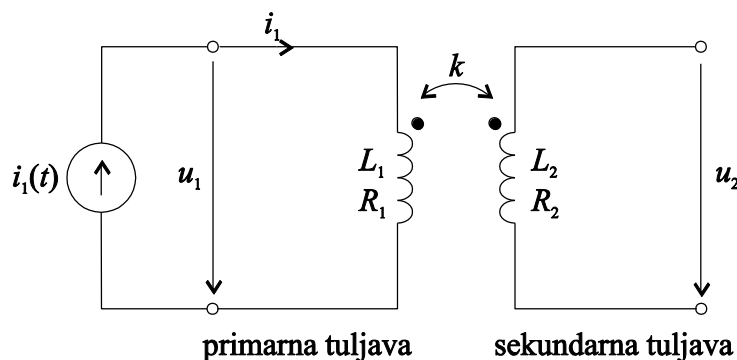
4. Priprava

Naloga

Zračni tuljavi sta naviti na isti tuljavnik in zato magnetno sklopljeni. Primarna tuljava ima ohmsko upornost $R_1 = 11,0 \, \Omega$ in induktivnost $L_1 = 17,6 \, \text{mH}$, sekundarna pa $R_2 = 1,4 \, \Omega$ in $L_2 = 2,8 \, \text{mH}$. Faktor medsebojnega sklopa med njima je $k = 0,95$. Primarno tuljavo napajamo s periodičnim tokom vršne vrednosti $I_{1V} = 50 \, \text{mA}$:

$$i_1(t) = \begin{cases} (30 \, \text{A/s})t & 0 \leq t < T/3 \\ 75 \, \text{mA} - (15 \, \text{A/s})t & T/3 \leq t < T \end{cases}$$

kjer je $T = 5 \, \text{ms}$ perioda (frekvenca je torej $f = 1/T = 200 \, \text{Hz}$). Sekundarna tuljava ima odprte sponke.



Magnetno sklopljeni tuljavi.



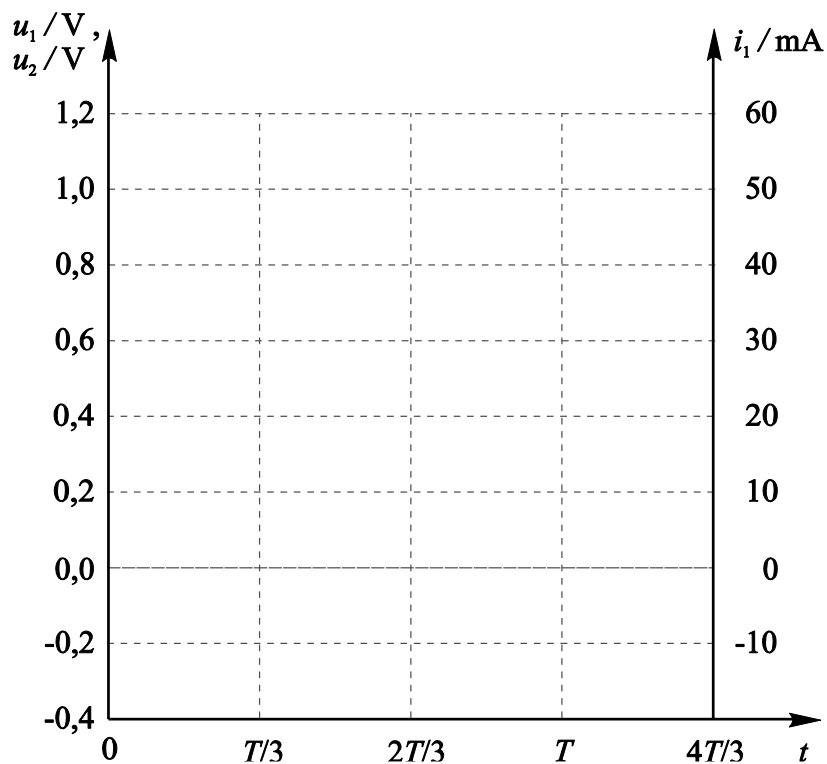
1. Določite časovni potek napetosti na primarni tuljavi $u_1(t)$ ter napetosti na sekundarni tuljavi $u_2(t)$.

$u_1(t) = \dots\dots\dots$

$u_2(t) = \dots\dots\dots$



2. V spodnji diagram z različnimi barvami narišite časovni potek toka skozi primarno tuljavo i_1 , napetosti na primarni tuljavi u_1 in napetosti na sekundarni tuljavi u_2 .



-  3. Koliko kaže idealni voltmetr ob časih $t_1 = T/6$ in $t_2 = 2T/3$, če je priključen na sponki primarne tuljave, in koliko kaže ob istih časih, če je priključen na sponki sekundarne tuljave?

$$u_1(t_1 = T/6) = \dots\dots\dots \text{ mV}, \quad u_1(t_2 = 2T/3) = \dots\dots\dots \text{ mV},$$

$$u_2(t_1 = T/6) = \dots\dots\dots \text{ mV}, \quad u_2(t_2 = 2T/3) = \dots\dots\dots \text{ mV}.$$

-  4. Kolikšna je vršna vrednost napetosti na primarni tuljavi in kolikšna napetosti, ki se inducira na sekundarni tuljavi?

$$U_{1VV} = \dots\dots\dots \text{ V}, \quad U_{2VV} = \dots\dots\dots \text{ mV}.$$

-  5. Razmislite o časovnem poteku toka skozi sekundarno tuljavo $i_2(t)$ in napetosti na njej $u_2(t)$, če na sponki te tuljave priključimo upor upornosti $R = 1,2 \, \Omega$. Kako je mogoče, da se v tem primeru v tokokrogu sekundarne tuljave sproščajo Joulske izgube, če pa galvanjsko ni povezan z virom?

Izračun:



4.1. Vprašanja:

- ? 1. Kdaj je magnetno polje tuljave sorazmerno njenemu toku?

- ? 2. Kaj pomeni znak – (minus) v enačbi za inducirano napetost (Faradayevem zakonu indukcije): $u_{\text{ind.}} = -d\phi/dt$? Kakšen je njegov matematični in kakšen fizikalni pomen? Zakaj tega minusa ni v enačbi za padec napetosti na tuljavi: $u_L = L di/dt$?

5. Delo v laboratoriju

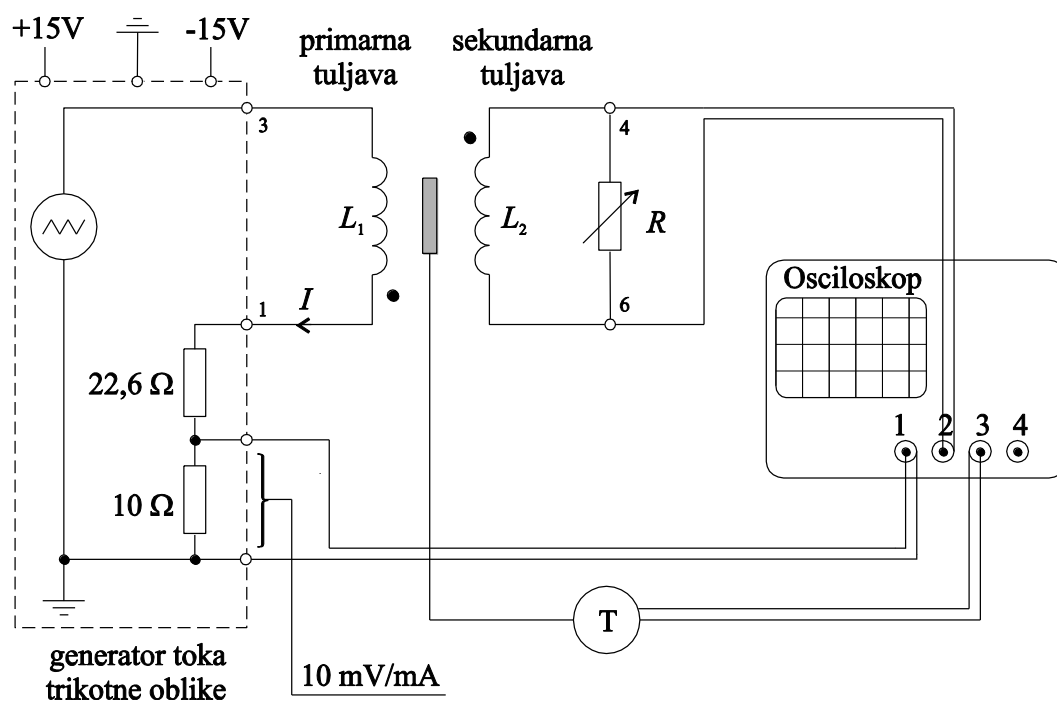
5.1. Naloge

1. izmeriti inducirano napetost na sekundarni tuljavi v odvisnosti od oblike električnega toka v primarni tuljavi,
2. opazovati obliko magnetnega polja v tuljavi v odvisnosti od oblike električnega toka v navitju tuljave,
3. določiti medsebojno induktivnost prek izmerjene inducirane napetosti.

5.2. Merilni pribor

1. tuljava z dvojn timer navitjem - primarnim in sekundarnim (zračni transformator brez jedra),
2. generator toka trikotne oblike,
3. osciloskop,
4. Teslameter z aksialno Hallovo sondo.
5. vezne žice.

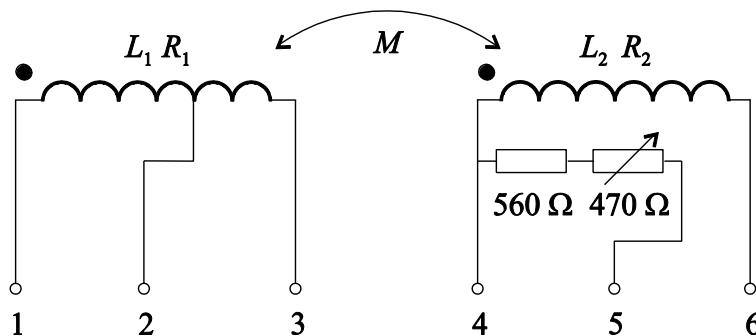
5.3. Merilna shema



5.4. Navodilo za delo v laboratoriju

Pri vaji merimo inducirano napetost na sekundarni tuljavi ter opazujemo magnetno polje v tuljavi v odvisnosti od električnega toka v primarni tuljavi.

1. Preučite prednjo ploščo osciloskopa in določite vlogo stikal, gumbov in priključnih sponk. Kratek opis prednje plošče osciloskopa in vloga stikal, gumbov in priključnih sponk je v Prilogi 2: Osciloskop (str. 82).
2. Vežite elemente v vaji po shemi s prejšnje strani. Generator toka trikotne oblike priključite na napajalno napetost $\pm 15\text{V}$. Pri spajanju bodite pozorni, da so vse ozemljitve (priključne sponke črne barve) povezane v isto točko/spojišče. Na kanal 1 osciloskopa priključite padec napetosti na upor $10\ \Omega$, skozi katerega teče električni tok primarne tuljave. Iz tega sledi, da je konstanta za izračun toka na podlagi izmerjene napetosti $10\ \text{V/A}$. V osciloskop jo vnesete z uporabo gumbov "CH1" in "Probe menu". Na kanal 2 priključite napetost sekundarne tuljave. Za merjenje toka, inducirane napetosti in frekvence izberite funkcijo "Quick Meas" ter za kanal 1 in 2 nastavite merjenje vršnih (Peak-Peak) vrednosti (uporabite tipke "Source", "Select" in "Measure"). Na kanal 3 priključite teslameter. Izberite "Coupling AC" (gumba "CH3" in "Coupling"). S tem preprečimo pomikanje žarka zaradi spremembe enosmernega nivoja signala iz teslametra – "DC drift". Da bodo zapisi na zaslonu osciloskopa ostri, vklopite funkcijo povprečenja (tipka »Acquire«, odprite »Acq Mode« in izberite »Averaging«).



3. Sondo za merjenje magnetnega polja vstavite v sredino tuljave. Z njo kontrolirajte časovno obliko gostote magnetnega pretoka v tuljavi. Merilno območje nastavite na $2\ \text{mT}$.
4. Kalibrirajte in naravnajte teslameter na ničlo po navodilu v prilogi 1.4. na str. 79. Ker nas pri naši meritvi zanimajo samo relativne spremembe magnetnega polja, nastavimo ničlo potem, ko smo sondo že namestili v tuljavo, vendar pred vklopom vira. Nastavitev v nični komori opustimo.
5. Po dovoljenju demonstratorja vključite napajanje.
6. Tokovni vir preklopite na trikotno obliko. Vršno vrednost amplitude in frekvenco toka v primarni tuljavi nastavite na zahtevane vrednosti (podane pod diagrami). Obliko toka nastavite tako, da tok $1/3$ periode narašča (bolj strmo) in $2/3$ periode upada (položneje).
7. Na osciloskopu raztegnite opazovane signale po obeh oseh tako, da bo na zaslonu cela perioda signala in da bo slika čim večja.



8. Z gumbom na tuljavi nastavite spremenljivi upor R tako, da bo inducirana napetost pravilne pravokotne oblike. Upor R , ki je sekundarni tuljavi vezan vzporedno, duši nihanja, ki se pojavijo zaradi induktivnosti tuljave in njene parazitne medovojne kapacitivnosti pri skokovitih spremembah napetosti.
9. Pri različnih frekvencah in amplitudah, ki so podane ob diagramih, prerišite z zaslona osciloskopa:
 - obliko električnega toka v primarni tuljavi ter
 - obliko magnetnega polja B v tuljavi in obliko inducirane napetosti na sekundarni tuljavi,

Označite konstante horizontalne in vertikalne skale, začetek in konec periode.

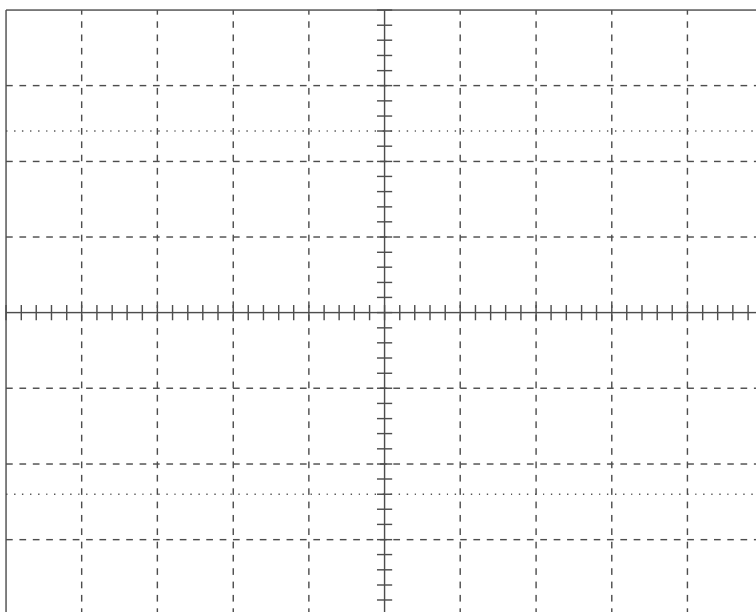
Alternativa:

Sliko signalov, ki jo vidimo na zaslonu osciloskopa (oscilogram) lahko skupaj z vsemi preostalimi oznakami na sliki shranimo na USB pomnilniški ključ. Za nastavitve formata (kot npr. BMP ali PNG), v katerem naj se oscilogram shrani, izberemo gumb "Utility", nato izberemo opcijo "Print Config" in potem še "Print to". Za samo shranjevanje slike ključ vtaknemo v USB režo osciloskopa in nato pritisnemo gumb "Quick Print". Po končanem snemanju lahko ključ odstranimo iz reže.

10. Odčitajte in zapišite vršno vrednost inducirane napetosti.



Diagram električnega toka i na primarni strani, gostote magnetnega polja B v tuljavi in inducirane napetosti u_2 pri frekvenci $f = 0,2$ kHz in vršni vrednosti primarnega toka $I_{VV} = 50$ mA.



Vrišite ničlo in zapišite koeficiente skale.

$$I_{VV} = 50 \text{ mA}$$

$$f = 0,2 \text{ kHz}$$

$$U_{VV2} = \dots\dots\dots \text{ V}$$

$$k_{y1} = \dots\dots\dots \text{ mA/razd}$$

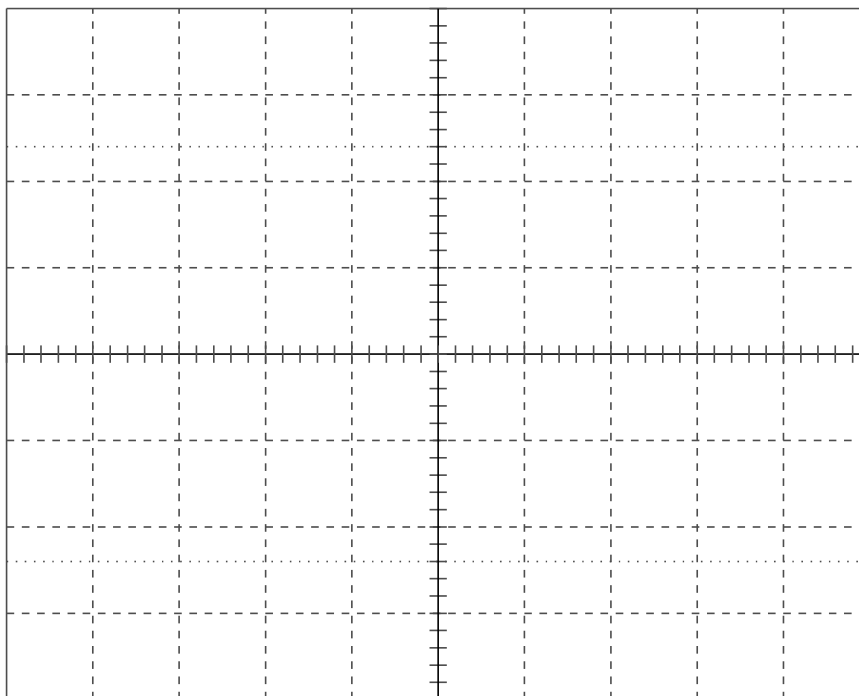
$$k_{y2} = \dots\dots\dots \text{ mV/razd}$$

$$k_{y3} = \dots\dots\dots \text{ mT/razd}$$

$$k_t = \dots\dots\dots \text{ ms/razd}$$



Diagram električnega toka i na primarni strani, gostote magnetnega polja B v tuljavi in inducirane napetosti u_2 pri frekvenci $f = 0,2$ kHz in vršni vrednosti primarnega toka $I_{VV} = 100$ mA.



Vrišite ničlo in zapišite koeficiente skale.

$$I_{VV} = 100 \text{ mA}$$

$$f = 0,2 \text{ kHz}$$

$$U_{VV2} = \dots\dots\dots \text{ V}$$

$$k_{y1} = \dots\dots\dots \text{ mA/razd}$$

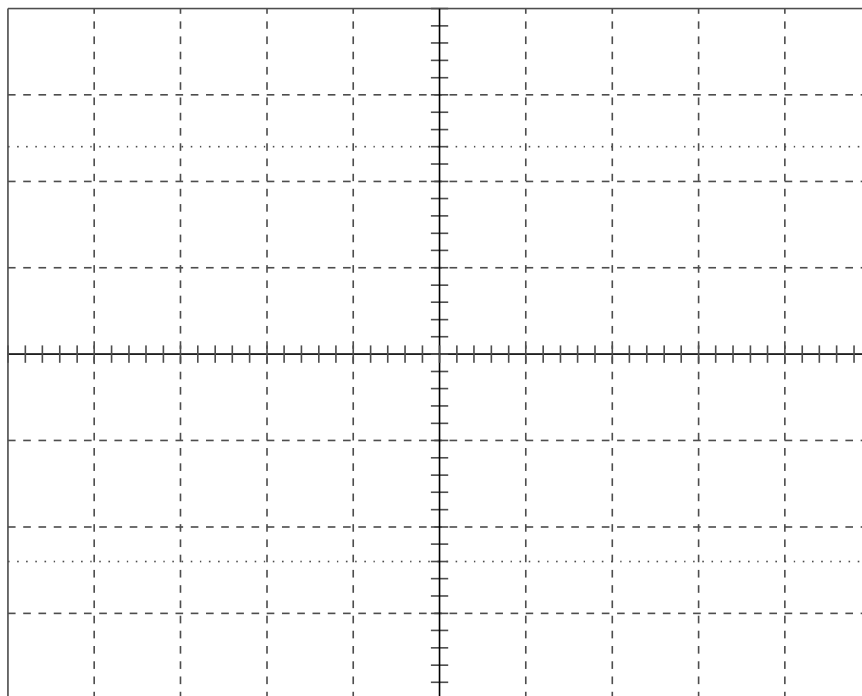
$$k_{y2} = \dots\dots\dots \text{ mV/razd}$$

$$k_{y3} = \dots\dots\dots \text{ mT/razd}$$

$$k_t = \dots\dots\dots \text{ ms/razd}$$



Diagram električnega toka i na primarni strani, gostote magnetnega polja B v tuljavi in inducirane napetosti u_2 pri frekvenci $f = 0,4$ kHz in vršni vrednosti primarnega toka $I_{VV} = 50$ mA.



Vrišite ničlo in zapišite koeficiente skale.

$I_{VV} = 50$ mA

$k_{y1} = \dots\dots\dots$ mA/razd

$f = 0,4$ kHz

$k_{y2} = \dots\dots\dots$ mV/razd

$U_{VV2} = \dots\dots\dots$ V

$k_{y3} = \dots\dots\dots$ mT/razd

$k_t = \dots\dots\dots$ ms/razd

11. Izključite napajanje.

12. Izračunajte medsebojno induktivnost med primarno in sekundarno tuljavo s podatki izmerjenimi pri frekvenci $f = 0,2$ kHz in vršni vrednosti primarnega toka $I_{VV} = 50$ mA.

$$M = \left| \frac{u_2}{di/dt} \right| = \left| \frac{u_2}{\Delta i / \Delta t} \right| = \dots\dots\dots \text{ mH.}$$

(V diagramu kotirajte uporabljene vrednosti u_2 , Δi , Δt).

Pregledal:

5.5. Dodatna vprašanja:

1. Pri vaji smo uporabili zračni transformator. Ocenite, do kakšnih sprememb bi prišlo, če bi uporabili transformator s feromagnetnim jedrom.
2. Pogosto potrebujemo pretvorbo nizke enosmerne napetosti v visoko in obratno. Raziščite in predstavite delovanje DC-DC pretvornika (angl. boost converter: http://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter).
3. Raziščite vezje s popularnim imenom Joulski tat (angl. Joule thief), ki je sposobno prenašati energijo iz vira (baterije) tudi pri njenih nizkih vrednostih napetosti.

Dodatni zapisi:



Priloge

1. Teslameter

Pri laboratorijskih vajah iz Osnov elektrotehnike, ki se nanašajo na magnetizem, študentje merijo konstantno in spremenljivo magnetno polje. Merijo gostoto magnetnega pretoka različnih temeljnih struktur (ovoja, tanke tuljave, feromagnetnih materialov) ter opazujejo pojave, povezane z magnetizmom (magnetilna krivulja, histerezna zanka, indukcija). S primerjanjem izmerjenih vrednosti z izračunanimi študent v praksi preverja svoje teoretično znanje kar mu omogoča prenos teorije v prakso.

Za merjenja potrebujemo našim potrebam prilagojen teslameter in pri sočasnem izvajanju laboratorijskih vaj z mnogo študenti veliko kosov posamezne merilne opreme. Profesionalni merilniki so običajno dragi in neprilagojeni našim potrebam. Zato smo se odločili zasnovati in izdelati preprost, cenen in našim potrebam prilagojen merilnik gostote magnetnega pretoka – teslameter. O njem smo poročali v [1].

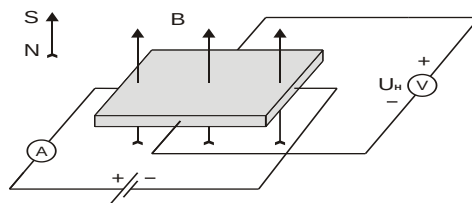
V omenjenem prispevku smo že napovedali, da je predstavljeni inštrument smiselno nadgraditi z baterijskim/adapterskim napajanjem, nadomestiti zunanji voltmeter z vgrajenim prikazovalnikom in merilnik magnetnega polja vgraditi v primerno ročno ohišje.

Zahteve za posodobljen merilnik magnetnega polja za laboratorijske vaje so:

- majhna poraba in nizka napajalna napetost-baterijsko napajanje,
- merilno območje 0 – 2 T, razdeljeno v 4 merilna področja,
- točnost in linearnost najmanj 2%,
- možnost priključitve različnih merilnih sond,
- določitev velikosti in smeri konstantnega magnetnega polja,
- merjenje konstantnega in spremenljivega magnetnega polja,
- vgradnja merilnika v primerno ohišje z vgrajenim prikazovalnikom.

1.1. Merjenje magnetnega polja s Hallovim pojavom

Pri gibanju naelektrenega delca Q s hitrostjo $\vec{v}$ v magnetnem polju gostote $\vec{B}$ deluje na delec sila $\vec{F}$, zaradi katere se v vodniku, skozi katerega teče električni tok, spremeni gostota nosilcev električnega toka. V prevodniku se pojavi dodatno električno polje Hallovo – polje $\vec{E}_H$. Tako se, pri ploščici iz prevodnega materiala, skozi katero teče električni tok I , v magnetnem polju B pojavi dodatna, prečna – Hallova – napetost U_H (slika 1).

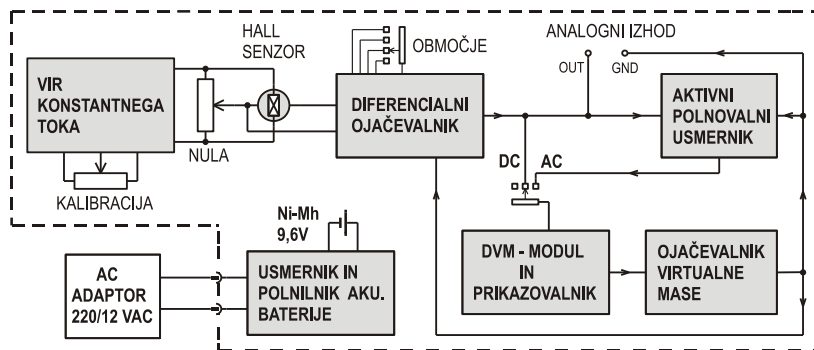


Slika 1: Hallov pojav pri pravokotni ploščici iz snovi z negativnimi nosilci naboja.

K_H je Hallova konstanta, ki je odvisna od materiala prevodnika. Hallov senzor je pravzaprav ploščica iz snovi z izrazitim Hallovim pojavom (ustrezen polprevodnik). Običajno je velika nekaj kvadratnih milimetrov in ima par priključkov za vzbujačni tok I na dveh stranicah in par priključkov za odjem Hallove napetosti U_H , na drugih dveh stranicah. Hallova napetost U_H je, pri konstantnem toku skozi ploščico, sorazmerna z gostoto B pravokotno v ploščico, kar je razvidno tudi iz enačbe (1.1).

$$U_H = K_H IB \quad (1.1)$$

1.2. Izvedba in delovanje teslametra



Slika 2: Blok shema teslametra

Sestavni deli teslametra, prikazani na blok shemi (sliki 2), prikazujejo razporeditev glavnih sklopov vezja po funkcijah. *Vir konstantnega toka* vzbuja Hallov senzor z enosmernim tokom. Velikost toka in s tem občutljivost sensorja je nastavljiva s preciznim 10 obratnim potenciometrom (gumb »CALIBRATION«). Kalibracija tako omogoča združljivost različnih sond in teslametrov.

Hallov senzor FH-301-040 (Bell) je vgrajen v radialne in aksialne sonde. Napetost, kot posledico napake pri pritrditvi napetostnih elektrod na Hallovo ploščico se izniči s potenciometrom nula (gumb »SET ZERO«).

Napetost Hallovega sensorja ojačuje *diferencialni ojačevalnik* s preklopnikom za izbiro ojačenja oziroma merilnega dosega. Ojačenja so nastavljena tako, da je maksimalna napetost izbranega dosega 2 V. *Aktivni polnovalni usmernik* pretvori analogni signal izmeničnega magnetnega polja v ustrezno enosmerno napetost.

Virtualna masa teslametra je potencial negativnega vhoda *DVM modula* s prikazovalnikom. Za delovanje vezja in analogni izhod ga ojačevalnik virtualne mase ustrezno ojači.

Vezje se napaja z vgrajeno akumulatorsko baterijo 9,6 V ali z vtičnim adapterjem 220/12 VAC.

Lastnosti teslametra:

- merilni doseg: 2 mT, 20 mT, 200 T, 2 T,
- razločljivost: 1 μ T, 10 μ T, 100 μ T, 1 mT,
- prikazovalnik: 3 ½ digit,
- analogni izhod: ± 2 V/maksimalni doseg, 50 Ω ,
- način delovanja: DC, AC – pri harmonični obliki polja, displej pokaže temensko vrednost,
- frekvenčno območje, analogni izhod: DC – 2000 Hz,
- točnost (DC): $\pm 2\%$,
- temperaturno območje delovanja: 0–40°C,
- zunanje mere: 170 $\times$ 85 $\times$ 35 mm,
- merilni sondi: radialna ($d = 0,7$ mm, $\bar{s} = 4,8$ mm, $l = 30$ mm); aksialna ($\phi = 7$ mm, $l = 100$ mm),
- napajanje: Ni-Mh akumulator - 9,6 V/170 mAh, adapter 220/12 V AC,
- poraba: 25 mA.

1.3. Delovanje teslametra

Vir konstantnega toka napaja Hallov senzor s konstantnim tokom stabilnosti 10⁻⁴, ki je odvisna predvsem od stabilnosti napetostne reference Ref₁, uporov R₃, R₄ in kalibracijskega potenciometra P₁. Operacijski ojačevalnik U₂ (LF411) vzdržuje padeč napetosti na upor R₃ enak napetosti Ref₁ (LM385), to je 1,2 V. Posledično je tudi tok, ki teče skozi T₁ (BS250), kalibracijski upor R₅, Hallov senzor in upor R₃₃ konstanten. Padeč napetosti na R₃₃ dvigne potencial priključkov senzorja proti potencialu virtualne mase in s tem v območje delovanja diferencialnega ojačevalnika U₅.

Tok skozi Hallov senzor določi napetostne potenciale tako tokovnega, kot napetostnega para njegovih priključkov, zato mora biti Hallova napetost ojačana diferencialno (instrumentacijski ojačevalnik U₅, INA 114). Pri najmanjšem dosegu 2 mT je potrebno ojačenje A = 6700. Z razdelitvijo ojačenja na dve ojačevalni stopnji, U₅ in U₅ je zagotovljena dovolj visoka frekvenčna meja in čim manjši fazni pomik signala. Želeni merilni doseg ali kalibracija (»CAL«) in prestavljanje decimalne pike na prikazovalniku se izbira s preklopniki na isti osi, ST₁ do ST₄.

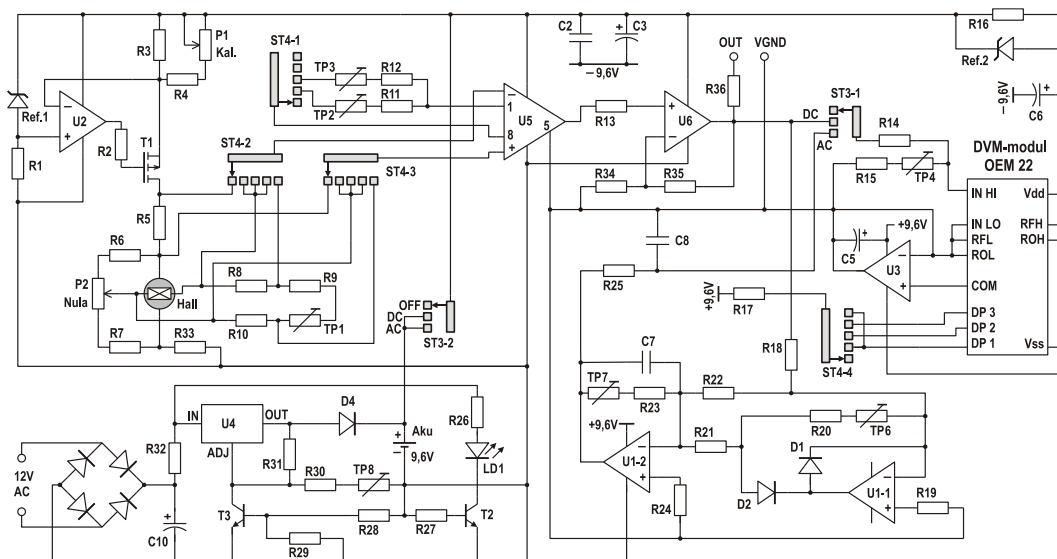
Pri prvi kalibraciji se sondo vstavi v referenčni magnet in na analogni izhod priključi voltmetr. S potenciometrom P1 (gumb »CALIBRATION«) se naravna napetost na voltmetru na vrednost ustrezno referenčnemu magnetu. Za referenčni magnet 100 mT je torej izbran merilni doseg 200 mT in je napetost na voltmetru naravnana na 1 V. S stikalom v položaju »CAL« voltmeter pokaže vrednost, ki je

sorazmerna padcu napetosti na upor R5, oziroma toku skozi senzor, pri katerem je senzor (sonda) kalibriran. Vrednost je karakteristična za senzor (sondo), zapisana je na sondi in pri njeni vsakokratni vnovični priključitvi na teslameter lahko služi za hitro kalibracijo brez uporabe referenčnega magneta.

Izmerjeno vrednost magnetnega polja kaže modul s $3\frac{1}{2}$ mestnim prikazovalnikom in A/D pretvornikom, OEM 22. Občutljivost modula 200 mV je za uporabo v teslametru razširjena na 2 V (delilnik napetosti R_{14} , TP_4 in R_{15}). Za pravilno merjenje napetosti na izhodu IC_2 (± 2 V) je potrebna »virtualna« masa, to je ojačan potencial negativnega vhoda DVM modula. Ustrezen potencial je na izhodu ojačevalnika IC_3 (TLC271) in je za 3 V nižji od napajalne napetosti modula. S tem je doseženo, da potencial virtualne mase samodejno sledi padanju napajalne napetosti praznjenja baterije tekom delovanja teslametra. Na potencial virtualne mase je vezan referenčni priključek diferencialnega ojačevalnika Hallove napetosti, masa analognega izhoda in masa aktivnega usmernika. Odmik napetosti virtualne mase (3 V od V_{dd}) je premajhen za doseganje potrebnih +2 V na izhodu diferencialnega ojačevalnika. Z referenco Ref_2 se zniža V_{dd} DVM modula za 1,2 V in posledično poveča odmik napetosti virtualne mase od V_{bat} na zadostnih 4,2 V. Vezje deluje pravilno do napetosti baterije 8,6 V. Pri tej napetosti DVM-modul aktivira opozorilni napis »LOW BAT« in baterijo je potrebno napolniti.

Prikaz izmerjenih vrednosti izmeničnih magnetnih polj na prikazovalniku omogoča aktivni polnovalni usmernik realiziran z dvojnimi operacijskimi ojačevalniki U_{1-1} in U_{1-2} (TLC 272). Amplituda usmerjene napetosti (nastavi se s TP_6 in TP_7) ustreza temenski vrednosti harmoničnega magnetnega polja (z majhnimi popačenji). Neharmonične signale se meri z osciloskopom na analognem izhodu. Glajenje usmerjene napetosti s C_7 in C_8 omogoča prikaz do spodnje frekvenčne meje 20 Hz.

Za polnjenje vgrajene 8 celične Ni-Mh akumulatorske baterije (9,6 V) se uporablja AC adapter 220/12 V. Za dolgo življenjsko dobo baterije se omeji polnilna napetost na 11,6 V (nastavljivo s TP_8) in tok na 80 mA (določen z vrednostjo R_{29}). Ko pade polnilni tok pod 20 mA je baterija polna in led dioda za indikacijo polnjenja LD_1 ugasne.



Slika 3: Vežalna shema teslametra



Slika 4: Teslameter-merilnik s priključeno sondo.
Na levi strani je viden priklop za voltmeter.

1.4. Uporaba teslametra

Pred vsakim izvajanjem sklopa meritev ali pri zamenjavi sonde je treba izvesti skrajšani postopek kalibracije teslametra. Tako pripravljen inštrument je nared za merjenje konstantnega magnetna polja, kot tudi časovno spremenljivih magnetnih polj nizkih frekvenc.

1.4.1. Kalibracija pred uporabo

Merilnik vklopite v položaj »DC«. Preklopnik za kalibracijo in izbiro dosega merjenja naj je v položaju »CAL«. Z gumbom za kalibracijo »CALIBRATION«

se naravna iznos na prikazovalniku ('displeju') na kalibracijsko vrednost napisano na priključeni sondi. S tem se nastavi tok skozi sondo in strmina njene U/B karakteristike glede na doseg.

Pred uporabo teslametra je potrebno vstaviti merilno sondo v magnetno ničelno komoro (v prostor z zanemarljivim magnetnim poljem) in z gumbom »SET ZERO« nastaviti na prikazovalniku vrednost nič. V primeru merjenja relativnih sprememb magnetnega polja, najprej namestimo sondo na mesto merjenja, nato pa (pri izklopljenem merjencu) nastavimo ničlo. V tem primeru nastavitve ničle v komori opustimo.

Teslameter je pripravljen za merjenje in njegova občutljivost je glede na merilni doseg:

2 mT ... 1 V/mT, 20 mT ... 100 mV/mT,
200 mT ... 10 mV/mT in 2 T ... 1 mV/mT.

1.4.2. Merjenje konstantnega magnetnega polja

Pri merjenju konstantnega magnetnega polja je preklopnik »OFF DC AC« v položaju »DC«. Sonda (senzor) je v točki merjenja gostote magnetnega pretoka. Na prikazovalniku je vrednost izmerjene komponente gostote, ki je pravokotna v Hallov senzor.

Pozitivno vrednost kaže, ko je smer gostote:

- a) pravokotno v rdečo stran sonde (senzorja) - pri radialni (ploščati) sondi,
- b) pravokotno v čelo sonde - pri aksialni (valjni) sondi.

Voltmeter, priključen v puše »ANALOG OUT« merilnika, kaže napetost, sorazmerno merjeni gostoti magnetnega pretoka v razmerju glede na merilni doseg.

Pri merjenju je treba upoštevati t.i. magnetni smog, to je magnetno polje drugih povzročiteljev. Magnetni smog tvori zemeljsko magnetno polje, magnetno polje tokov v omrežju, magnetno polje trajnih magnetov v bližini merilnega mesta, magnetno polje elektromagnetnih naprav v okolici itd. Pri merjenjih, kjer se da merjenca izklopiti, se izloči vpliv magnetnega smoga tako, da se posebej izmeri magnetno polje samo magnetnega smoga in posebej skupno polje magnetnega smoga in polje merjenca. Merjeno polje merjenca je razlika obeh. Kadar to ni mogoče, je potrebno uporabiti drugačne metode, npr. zastiranje magnetnega smoga z ustreznim oklopom iz dobrega magnetnega prevodnika.

1.4.3. Merjenje časovno spremenljivega magnetnega polja

Električni tok povzroča magnetno polje, spremenljivo magnetno polje pa povzroča inducirano električno polje. Njihove medsebojne odvisnosti lahko opazujemo istočasno na večkanalnem osciloskopu, kjer prikažemo spremenljiv električni tok (v ovojih tuljave), spremenljivo magnetno polje (v tuljavi) in inducirano napetost (na tuljavi). Kanal osciloskopa, ki kaže gostoto magnetnega pretoka B , se priključi v puše »ANALOG OUT« na levi strani merilnika.

Frekvenca merjenega magnetnega polja mora biti zadosti nizka, da je vpliv parazitnih kapacitivnosti in parazitnih induktivnosti v uporabljenih elementih zanemarljiv.

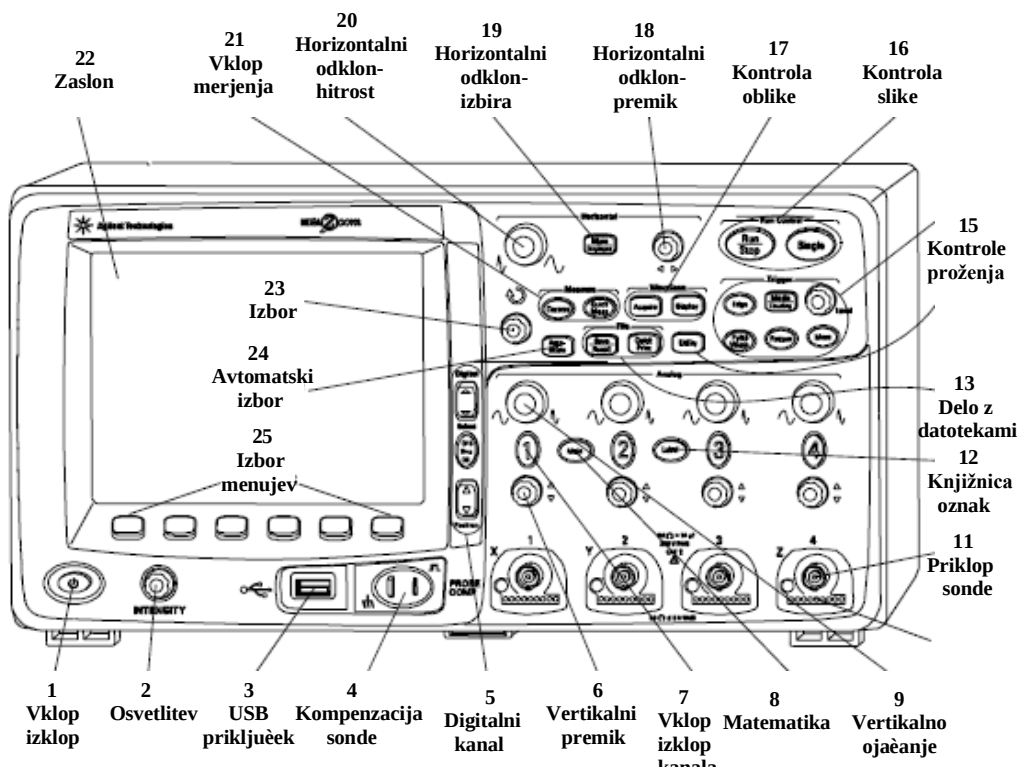
1.5. Viri

- [1] Kokelj P., Tacar D., Humar I.: Razvoj, izdelava in uporaba merilnika gostote magnetnega pretoka - Teslametra. Zbornik devetnajste Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2010, Portorož, B:369-372.
- [2] F.W.Bell: Hall sensor solutions
- [3] Tacar D.: Delovni in laboratorijski zapiski
- [4] Horowitz P., Hill W.: The art of electronics
- [5] National: Linear databook, 1980
- [6] Burr Brown: IC data book, 1994
- [7] <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tlc271.pdf>

2. Osciloskop

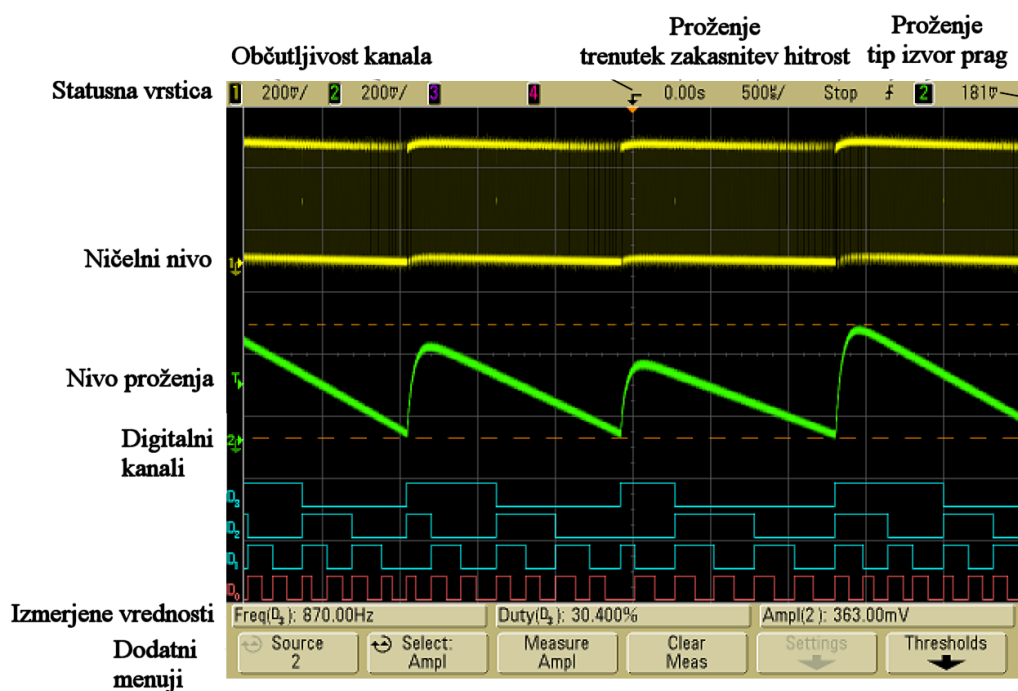
Štiri kanalni digitalni osciloskop ima veliko paleto možnih meritev, od katerih bomo pri teh vajah uporabili le nekaj. Seznanili se bomo z njim toliko, kot je potrebno za naše meritve. Po drugi strani je osciloskop prijazen za uporabo. Napisi, označbe, dodatne osvetlitve in simboli na prednji plošči in na zaslonu pregledno kažejo vlogo gumbov, priključkov in stikal za pripravo in uporabo osciloskopa. Preprost je izbor kanalov, elementov proženja, načina dela in izbor pregledne slike signala, ki ga opazujemo ali ga želimo opazovati. Dodatni zapisi in označbe na zaslonu kažejo izbran način dela in izbrane elemente. Pri vsakem načinu dela osciloskop ponudi dodatni izbor menujev in osvetli elemente, ki so potrebni za željeno nastavitve. Če hočemo opraviti operacijo, ki ni mogoča v izbranem načinu dela, opozori na nedopustno zahtevo.

Od tu danih navodil je v nadaljevanju le opis prednje plošče z vlogo stikal, priključkov in gumbov ali skupine gumbov.



Slika 1: Osciloskop in kontrolne tipke/gumbi

Dan je tudi prikaz elementov, ki jih vidimo na zaslonu pri meritvah (ne vidimo vedno vseh, ki so tu prikazani).



Slika 2: Elementi na zaslonu osciloskopa

Za pravilno nastavitev in željeno delovanje pri konkretni meritvi moramo upoštevati dodatne menuje, ki jih ponudi osciloskop in jih pravilno uporabiti. Več navodil za uporabo osciloskopa je na voljo na video posnetku z naslovom Uporaba osciloskopa za prikaz časovno spremenljivih veličin, ki se nahaja na spletni strani <http://oe.fe.uni-lj.si/> v razdelku Video gradivo eksperimentov - Izmenična električna vezja.

3. Ampermeter

Ampermeter - namizni univerzalni merilni instrument Agilent U3401A ponuja naslednji dve merilni območji (na priključnih pušah "LO" in "A"):

- 5 A (izpis na zaslonu 0,0000 A, glej sliko 1); notranja upornost je $0,03\ \Omega$
- 10 A (izpis na zaslonu 00,000 A)

Do omenjenih merilnih dosegov pridemo s tipko "DCI" in puščicama (gor/dol) "Hi" in "Lo".

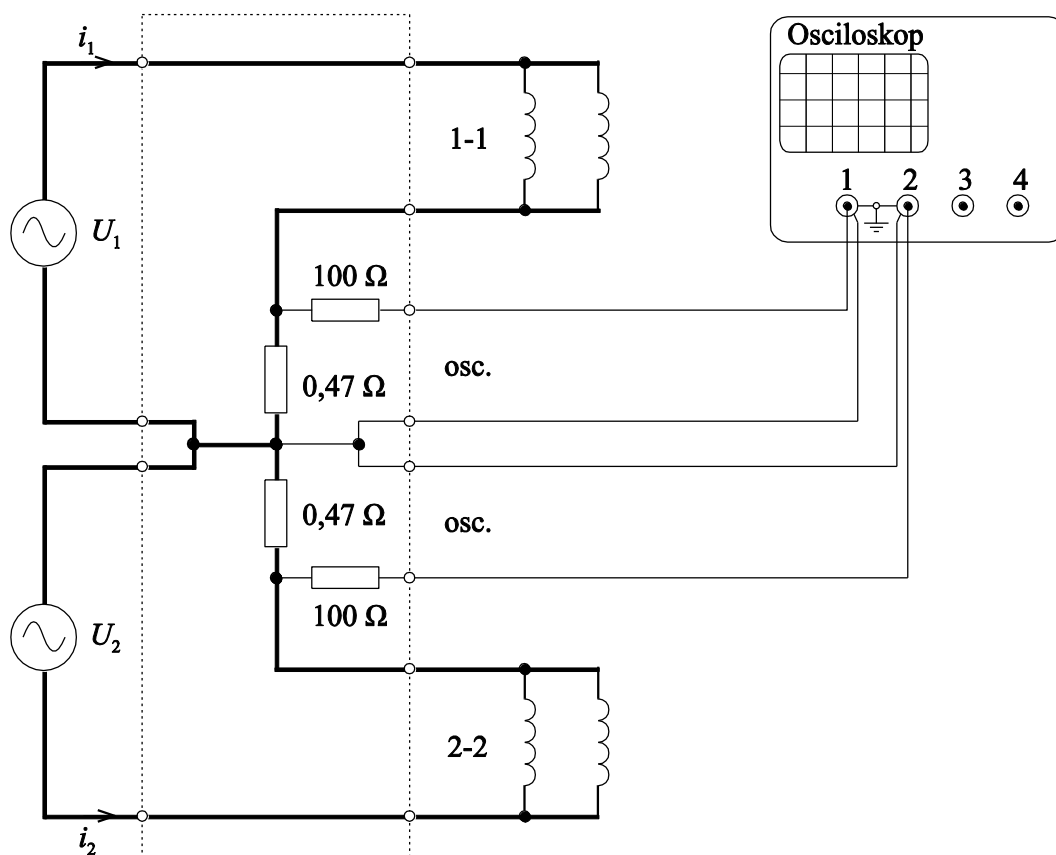


Slika 1: Ampermeter na 5 A merilnem območju

4. Vezalna shema vezja za generiranje vrtilnega magnetnega polja

Spodnja shema prikazuje vezavo elementov v vezju vaje »Vrtilno magnetno polje«.

Toka i_1 in i_2 , ki tečeta skozi pare tuljav, na osciloskopu opazujemo posredno preko padcev napetosti na parom zaporedno vezanih uporih upornosti $0,47\ \Omega$, skozi katera tečeta ta toka. Upora upornosti $100\ \Omega$ sta v vezju zgolj za zaščito v primeru napačne vezave.



Slika 1: Vezava elementov v vezju za generacijo vrtilnega magnetnega polja

Viri



- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založba FE, 2018.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2005.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2006.
- [4] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 3, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2006.
- [5] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1996.
- [6] Kokelj P.: Osnove elektrotehnike – Rešeni primeri in naloge, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1994.
- [7] Kokelj P., Abolnar S.: Zgledi iz osnov elektrotehnike, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2004.
- [8] Kokelj P., Tacar D.: Vrtilno magnetno polje – fazni generator, Zbornik dvanajste Elektrotehniške in računalniške konference ERK'03, Vol. B, uredil B. Zajc, Portorož, september 2003, str. 541 – 544.
- [9] Kokelj P., Tacar D.: Frekvenčne odvisnosti-signal generator, Zbornik desete Elektrotehniške in računalniške konference ERK'01, Vol. B, uredil B. Zajc, Portorož, september 2001, str. 401 – 404.
- [10] Kokelj P., Tacar D.: Napajalni vir-harmonični in enosmerni. Zbornik trinajste mednarodne elektrotehniške in računalniške konference ERK2004. Vol. A. Uredila Baldomir Zajc in Andrej Trost, Ljubljana, september 2004, str. 377-380.
- [11] Leybold Didactic Gmbh, General Catalogue Physics. Huert 1992, str. 342 – 347.

Skripta je predvidena kot delovni zvezek in priročnik študentom pri opravljanju laboratorijskih vaj iz Osnov elektrotehnike II. Laboratorijske vaje so predvidene kot dopolnitev teoretičnih razlag na predavanjih oziroma praktično preverjanje pri avditornih vajah izračunanih primerov. Skripta vsebuje štiri vaje, ki pokrivajo različne teme in vsebujejo po enega ali več poskusov. Tema je predstavljena s kratkim uvodom, sledijo navodila za pripravo z literaturo in nalogo, potrebno za razumevanje dela v laboratoriju. Predstavljena je vezalna shema vezja s tehničnimi podatki, podatki o napajanju, uporabljenih merilnih instrumentih in priboru. Podana so navodila za varno delo. V priložene tabele in diagrame študent med vajo v laboratoriju vpiše izmerjene vrednosti in nariše ugotovljene odvisnosti.

Magnetno polje, magnetilna krivulja, histerezna zanka, inducirano električno polje, inducirana napetost, gostota magnetnega pretoka, magnetni fluks, vrtilno magnetno polje.

Iztok Humar izvaja predavanja, vodi vaje in raziskovalno sodeluje pri predmetih Osnove elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Je avtor dveh univerzitetnih in dveh gimnazijskih učbenikov.

Edi Bulić je asistent pri predmetih Osnove elektrotehnike in Elektromagnetika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja z numeričnimi metodami za izračun elektromagnetnega polja.

Dejan Križaj uči Osnove elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno vodi Laboratorij za bioelektromagnetiko, kjer se ukvarja z raziskavami vplivov elektromagnetnega polja na biološke sisteme.

Anton Rafael Sinigoj je na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani predaval Osnove elektrotehnike I in II in Elektromagnetiko. Področje njegovega dela sta teorija elektromagnetnega polja in uporaba numeričnih metod v elektromagnetiki. Je tudi avtor treh univerzitetnih in treh gimnazijskih učbenikov.

Laboratorijske vaje iz OE II

Ključna gesla

I. Humar

E. Bulić

D. Križaj

A. R. Sinigoj